This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

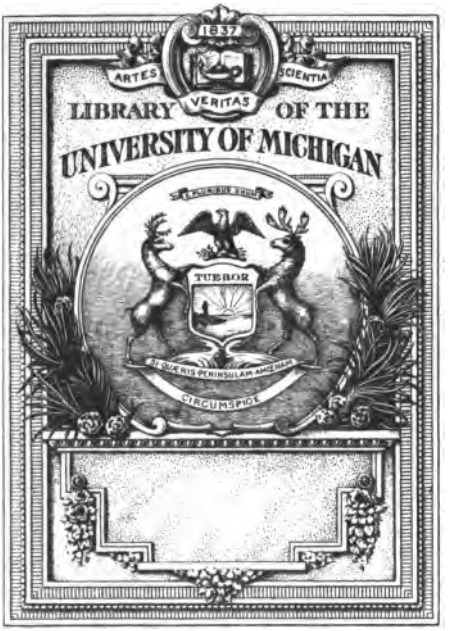
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`


1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
CIRCUMSPICE

QC
518
.G279t

G 27

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ

PAR

J. GAVARRET

Professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Paris.

TOME DEUXIÈME

avec 168 figures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE DE VICTOR MASSON

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

M DCCC LVIII

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ

Paris. — Imprimerie de L. MARTINET, rue Mignon, 2.

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ

PAR

J. GAVARRET

Professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Paris.

—

TOME DEUXIÈME

avec 168 figures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE DE VICTOR MASSON

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

M DCCC LVIII

Droit de traduction réservé.

QC
578
.G279t

AVANT-PROPOS.

Library com.
Perella
5-22-24
9949

Le Traité dont nous publions aujourd'hui le deuxième et dernier volume est exclusivement consacré à l'exposition de la théorie physique de l'électricité. Cette étude devait nécessairement précéder l'histoire des nombreuses et importantes applications de l'électricité aux arts, à l'industrie, à la physiologie, à la thérapeutique.

La seconde partie de notre travail se composera de deux publications distinctes : l'une sera une étude de l'électricité considérée dans ses rapports avec les êtres vivants, et en particulier avec l'homme dans l'état de santé et de maladie ; l'autre comprendra les applications des propriétés physiques et chimiques de cet agent.

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE IV.

LOIS GÉNÉRALES DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

En 1827, M. Ohm (d'Erlangen) publia, sous le titre de *Théorie mathématique de la pile*, un ouvrage qui attira fortement l'attention des physiciens. Dans ce travail, les lois du mouvement de l'agent électrique dans un circuit voltaïque fermé ne sont pas données comme des conséquences d'une simple hypothèse ; le savant physicien allemand en a démontré l'exactitude par des expériences directes faites avec une pile thermo-électrique, seul électromoteur à force constante qui fût alors connu. Les idées émises par M. Ohm se répandirent avec rapidité ; sous leur influence, la science s'enrichit, en peu d'années, de nombreux et importants travaux entrepris dans cette direction. Nous nous contenterons de mentionner ici les *résultats numériques d'observations de la pile galvanique* de M. Fechner, publiés en 1831 ; divers mémoires de MM. Becquerel et De la Rive, et surtout les importantes recherches de M. Pouillet (1) sur les lois des

(1) *Séances de l'Académie des sciences* du 3 octobre 1831, du 20 février et du 22 mai 1837.

courants électriques. De ce grand mouvement scientifique est sortie une théorie physico-mathématique, qui permet de ramener à un petit nombre de lois générales les phénomènes de propagation de l'électricité dynamique.

Quelle que soit l'origine d'un courant électrique, son *intensité* peut être mesurée par la *quantité de travail* qu'il produit. Pour apprécier cette quantité de travail, on peut se servir soit d'un effet physique, comme la déviation de l'aiguille aimantée, soit d'un effet chimique, comme la décomposition de l'eau ou de tout autre électrolyte. Ce travail accompli dépend évidemment lui-même de deux éléments : la force *électromotrice* qui détermine et entretient la circulation de l'agent électrique, et les *résistances* que l'électricité doit surmonter pour traverser l'électromoteur et les diverses pièces du circuit interpolaire.

ARTICLE PREMIER.

DES RÉSISTANCES DU CIRCUIT ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

Il est facile de démontrer que l'introduction d'un conducteur quelconque dans le circuit d'un courant électrique suffit pour diminuer son intensité : tout conducteur oppose donc une certaine résistance à la propagation du courant.

Soient, en effet (Fig. 281) : V, un couple à courant constant ; G, un galvanomètre ; A et B, deux pinces métalliques fixées sur des pièces de bois. Entre ces deux pinces A, B, tendons un fil métallique ; faisons communiquer une des extrémités du galvanomètre G avec le pôle positif de l'élec-

tromoteur V, et l'autre, en A, avec le fil métallique AB ; complétons le circuit à l'aide d'un fil métallique fixé au pôle négatif du couple V, et à un curseur métallique K, mobile le long d'une règle métallique R divisée en millimètres. Le curseur K porte une pince métallique C entre les branches de laquelle est pressé le fil AB. On peut ainsi faire varier à volonté la distance AC, et, par conséquent,

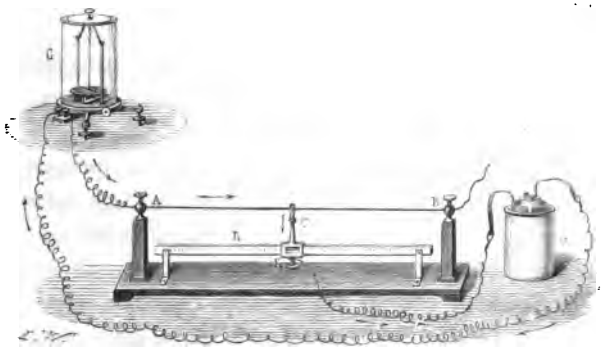


Fig. 281.

la longueur de la portion du fil AB traversée par le courant. Le circuit entier du courant se divise en deux parties bien distinctes. — La première, AGVC, est *invariable ;* elle se compose du fil du galvanomètre G et de ses communications avec la pince A et avec le pôle positif du couple V, de ce couple V lui-même et du fil qui réunit son pôle négatif au curseur K, enfin de la pince C. — La seconde comprend uniquement la portion AC du fil d'essai qui s'étend de la pince fixe A à la pince mobile C ; sa longueur *varie* nécessairement avec la position de la pince mobile C.

Le circuit voltaïque étant fermé, donnons successivement au curseur K des positions différentes sur la règle R, et notons la déviation de l'aiguille du galvanomètre G correspondante à chacune des valeurs de la distance AC. Ces observations bien simples suffisent pour établir que :

1° Pour un fil métallique AB de nature et de diamètre invariables, la déviation est d'autant plus faible que la distance AC est plus grande.

2° Pour des fils AB de même nature et pour une même distance AC, la déviation est d'autant plus faible que le diamètre du fil essayé est plus petit.

3° Avec des fils AB de même diamètre et de nature différente, il faut donner à la distance AC des valeurs différentes pour que la déviation de l'aiguille du galvanomètre reste la même.

D'ailleurs, on obtient des résultats de même genre en remplaçant le fil métallique AB par des colonnes liquides de section, de longueur et de nature variables.

Dans toutes ces expériences, la force électromotrice est constante, et les conditions physiques des conducteurs restent elles-mêmes invariables dans toutes les parties du circuit, excepté entre le point A et le point C. Si donc l'intensité du courant, traduite par la déviation de l'aiguille aimantée, éprouve des variations, cela ne peut provenir que des changements survenus dans la *résistance* de la portion AC du circuit. Nous pouvons donc considérer la proposition suivante comme démontrée :

Tout conducteur placé dans le circuit d'un courant lui oppose une certaine résistance dont la valeur dépend à la

fois de sa nature, de sa longueur et de l'étendue de sa section transversale.

§ Ier. — Résistances des conducteurs solides et liquides.

M. Wheatstone (1) et M. Ed. Becquerel (2) ont publié, dans ces derniers temps, des travaux très étendus sur la détermination des *résistances* que les conducteurs solides et liquides opposent aux courants électriques. Avant d'aborder l'exposition des procédés qu'ils ont employés et des résultats qu'ils ont obtenus, il est nécessaire de définir quelques expressions dont nous aurons souvent occasion de nous servir.

L'expression de *fil normal* sert à désigner un fil de cuivre cylindrique, pur et recuit, d'une longueur quelconque et d'un *millimètre* de diamètre. — L'*unité de résistance* adoptée est la résistance opposée au courant par un *fil normal* d'*un mètre* de longueur.

Cela posé, pour mesurer la résistance d'un conducteur quelconque, il suffit de déterminer, en mètres et fractions de mètre, la longueur de *fil normal* qui, substituée à ce conducteur, opposerait la même résistance à la propagation de l'électricité.

Nous appellerons, avec M. Pouillet, *longueur réduite* du conducteur, cette *longueur de fil normal* qui sert de mesure à sa résistance.

La *résistance spécifique* d'un conducteur quelconque, solide ou liquide, est la résistance opposée au courant élec-

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, 1844, t. X, p. 257.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1846, t. XVII, p. 242.

trique par un cylindre d'*un millimètre* de diamètre, d'*un mètre* de longueur, et de *même nature* que ce conducteur.

Rhéostat. — Cet appareil, imaginé par M. Wheatstone, est très commode pour étudier les lois de la résistance des divers conducteurs. Il se compose (Fig. 282) de deux cylindres H, H', de même longueur et de même diamètre,

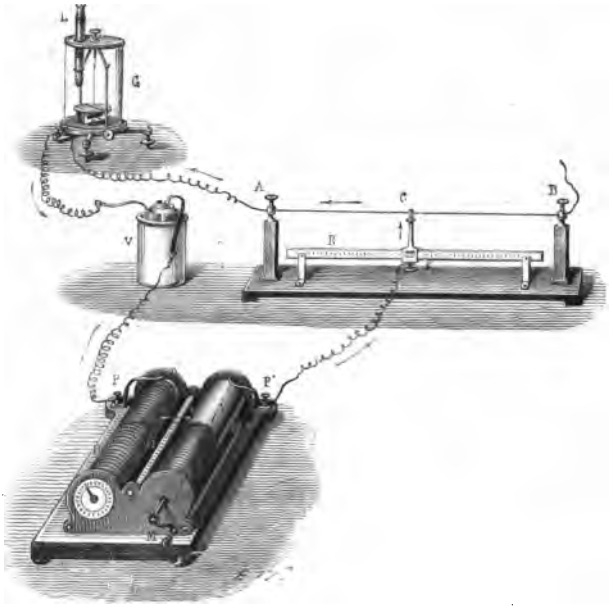


Fig. 282.

placés parallèlement. H est un cylindre de bois ; une de ses extrémités est entourée d'un cercle métallique D sur lequel appuie une languette métallique et élastique, fixée au bouton métallique P. Sur la surface du cylindre H est

creusée une rainure en hélice. A l'anneau D est fixé un des bouts d'un fil de cuivre recuit d'*un millimètre* de diamètre. On enroule ce *fil normal* autour du cylindre de bois, en ayant soin de le loger dans la rainure pour que ses diverses spires soient bien isolées ; puis on attache l'autre bout du fil à l'extrémité du cylindre H'. Ce dernier cylindre H' est métallique ; une languette métallique élastique part du bouton P', et appuie sur l'extrémité du cylindre H' opposée à celle qui sert à fixer le *fil normal*. Quand on met la manivelle M en mouvement, les deux cylindres tournent à la fois sur leurs axes, avec la même vitesse et dans le même sens. Il est facile de voir que, suivant le sens du mouvement de rotation, le *fil normal* passe tantôt du cylindre de bois H sur le cylindre métallique H', tantôt du cylindre métallique H' sur le cylindre de bois H.

Le diamètre commun des cylindres étant connu, pour mesurer la longueur de *fil normal* qu'on a fait passer d'un cylindre à l'autre, il suffit de déterminer le nombre de tours de rotation exécutés par ces cylindres. A cet effet, on place, entre les deux cylindres, une règle de bois I divisée en parties égales, dont la longueur commune est la même que celle du pas de l'hélice tracée sur le cylindre de bois H. Évidemment, pour chaque révolution entière exécutée par les cylindres, le point d'entrecroisement du *fil normal* et de la règle avance ou recule d'une division. L'aiguille du cadran tracé sur une des bases du cylindre H indique les fractions de tour. En lisant, sur la règle I, le nombre de divisions dont s'est déplacé le point d'entrecroisement, et en tenant compte des indica-

tions fournies par l'aiguille du cadran, il est donc toujours facile de déterminer la valeur absolue du mouvement de rotation exécuté par le système. On peut donc, dans chaque expérience, mesurer exactement la longueur de *fil normal* qu'on a fait passer d'un cylindre à l'autre.

Au moyen des boutons métalliques P, P′, introduisons le rhéostat dans un circuit électro-dynamique, et supposons que le courant arrive par le bouton P. L'électricité parcourt nécessairement toute la longueur de *fil normal* enroulée sur le cylindre de bois. Parvenu au point où le fil touche la surface du cylindre métallique H′, le courant quitte le fil, traverse le cylindre H′ lui-même, et s'échappe par le bouton métallique P′. Mais, en raison de l'étendue de la section transversale de H′, la résistance de la portion de ce cylindre traversée par le courant est complétement négligeable. La *résistance* du rhéostat est donc égale à celle de la portion de *fil normal* enroulée sur le cylindre de bois H. Il en résulte que, pour *chaque mètre de fil normal* qu'on fait passer de H′ en H ou de H en H′, la *résistance* du rhéostat augmente ou diminue d'*une unité*.

Lois de la résistance des conducteurs solides. — Faisons communiquer (Fig. 283) un galvanomètre G, d'une part, avec le pôle négatif d'un électromoteur V à force constante, et, d'autre part, avec l'extrémité A d'un fil métallique tendu entre les deux pinces métalliques fixes A, B; faisons, en outre, communiquer le rhéostat avec le pôle positif de l'électromoteur V par son bouton P, et avec le curseur K par son bouton P′. La *résistance totale* du circuit fermé se compose de deux parties distinctes. — La première est *constante* et égale à la somme des

résistances du fil du galvanomètre, de l'électromoteur V lui-même, et des fils qui font communiquer les boutons métalliques P, P du rhéostat avec le pôle positif de l'électromoteur V et avec le curseur K. — La seconde partie

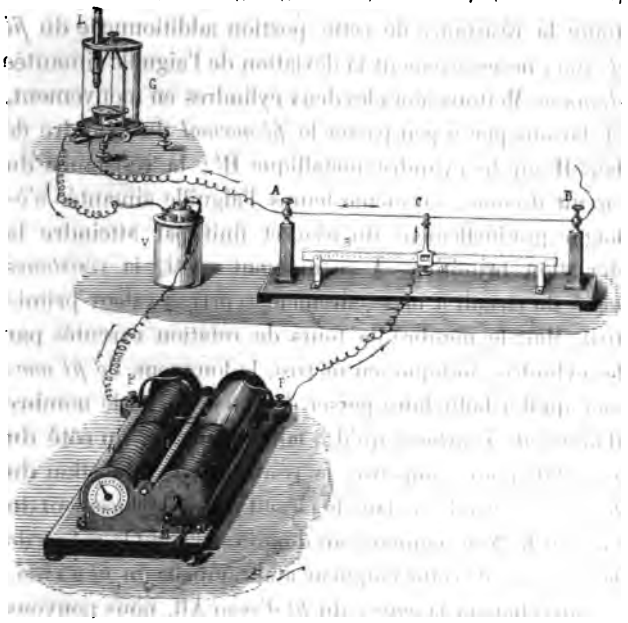


Fig. 283.

de la *résistance totale* se décompose elle-même en deux *résistances partielles*, *variables* toutes les deux : celle de la portion de *fil normal* enroulée sur le cylindre de bois H, et celle de la portion du *fil d'essai* AB comprise entre la pince fixe A et la pince mobile C.

Les cylindres du rhéostat étant à l'état de repos, notons

la position de la pince mobile C, et, à l'aide de la lunette L, la position d'équilibre de l'aiguille du galvanomètre. Cela fait, éloignons le curseur K de la pince A, et faisons ainsi entrer dans le circuit une nouvelle longueur *connue* du *fil d'essai* AB. La résistance du circuit est *augmentée* de toute la résistance de cette portion additionnelle du *fil d'essai ;* nécessairement la déviation de l'aiguille aimantée *diminue*. Mettons alors les deux cylindres en mouvement, et faisons peu à peu passer le *fil normal* du cylindre de bois H sur le cylindre métallique H' ; la résistance du circuit *diminue*, en même temps l'aiguille aimantée s'éloigne graduellement du *zéro*, et finit par atteindre la déviation primitive. A ce moment aussi, la *résistance totale* du circuit a nécessairement repris sa valeur primitive. Mais le nombre de tours de rotation exécutés par les cylindres indique, en mètres, la longueur de *fil normal* qu'il a fallu faire passer de H en H', ou le nombre d'*unités de résistance* qu'il a fallu retrancher du côté du rhéostat, pour compenser la résistance de la portion du *fil d'essai* introduite dans le circuit par le déplacement du curseur K. Nous connaissons donc exactement la valeur de la *résistance* de cette longueur additionnelle du *fil d'essai*.

Sans changer la *nature* du *fil d'essai* AB, nous pouvons faire varier son *diamètre* et la *longueur* de ce fil comprise dans le circuit voltaïque. Si nous déterminons chaque fois la longueur de *fil normal* dont la résistance est égale à celle d'une longueur connue du *fil d'essai*, l'expérience démontre que ces longueurs de *fil normal* nécessaires pour ramener l'aiguille du galvanomètre à sa position primitive sont en *raison directe des longueurs*, et *en raison*

inverse des carrés des diamètres des portions additionnelles du *fil d'essai* introduites dans le circuit. Et, puisque *chaque unité* de longueur de *fil normal* représente une *unité de résistance* opposée au courant électrique, il en résulte que :

La résistance d'un conducteur métallique quelconque de nature invariable est en *raison directe* de sa longueur, et en *raison inverse* du carré de son diamètre, ou de sa section transversale.

Cette loi, primitivement établie par Davy, a été vérifiée par tous les observateurs qui, depuis, se sont occupés du même sujet. Elle prouve que la transmission de l'électricité dynamique s'opère de molécule à molécule dans toute l'épaisseur du conducteur.

Dans son mémoire déjà cité, M. Wheatstone indique des procédés fondés sur les propriétés des courants dérivés qui permettent, sans le secours du rhéostat, de déterminer avec beaucoup de précision la résistance des fils métalliques. — Dans son travail, M. Ed. Becquerel a employé un galvanomètre différentiel. Le courant de l'électromoteur est bifurqué; les deux courants partiels passent l'un dans le *fil normal* du rhéostat, l'autre dans le *fil d'essai*, et traversent, en sens inverses, les deux fils du galvanomètre.

Lois de la résistance des conducteurs liquides. — MM. Wheatstone et Ed. Becquerel ont imaginé des méthodes d'observation qui permettent de mesurer avec une grande exactitude la résistance des liquides, et de se mettre à l'abri des perturbations provenant des décompositions électrolytiques. Nous ne pouvons entrer

ici dans les détails de ces procédés; nous nous contenterons de dire que la résistance des conducteurs liquides suit les mêmes lois que celle des conducteurs métalliques, pourvu que, comme le fait observer M. Pouillet, la longueur de la colonne du liquide essayé ne soit pas inférieure à cinq ou six fois son diamètre.

Détermination des résistances spécifiques. — Une fois connues les lois suivant lesquelles la longueur et la section transversale d'un circuit ou d'une portion de ce circuit influent sur sa résistance à la propagation du courant électrique, il est facile de déterminer les résistances spécifiques des divers conducteurs solides ou liquides. Soient, en effet :

l, la longueur d'un conducteur quelconque solide ou liquide ;

s, la section transversale de ce conducteur;

x, la résistance spécifique de ce conducteur.

Au moyen du rhéostat, déterminons, en mètres et en fractions de mètre, la longueur λ de *fil normal* qui oppose au courant la même résistance que le conducteur en expérience, ou la *longueur réduite* de ce conducteur. D'après l'*unité* de résistance adoptée, la valeur numérique de λ exprime nécessairement la *résistance totale* de ce conducteur.

Mais, d'autre part, puisque x est la *résistance spécifique* de ce conducteur, c'est-à-dire la résistance d'un cylindre de même nature ayant *un mètre* de longueur et *un millimètre* de diamètre, il résulte des lois expérimentales précédemment établies, que sa *résistance totale* est égale à :

$$x\frac{l}{s}.$$

Égalant ces deux expressions de la *résistance totale* du conducteur, nous avons, pour déterminer x, l'équation suivante :

$$x\frac{l}{s}=\lambda;$$

d'où

$$x=\lambda\frac{s}{l}.$$

Le mémoire déjà cité de M. Ed. Becquerel contient un grand nombre de déterminations de *résistances totales* opposées par les divers conducteurs, solides et liquides, à la propagation du courant électrique. A l'aide de ces données, il est facile de calculer les *résistances spécifiques* des diverses substances conductrices. En effet, en prenant toujours pour *unité* la résistance du fil de cuivre recuit, d'*un mètre de longueur* et d'*un millimètre de diamètre*, il suffit évidemment de ramener le résultat fourni par chaque expérience à ce qu'il aurait été pour un cylindre de la substance essayée ayant *un mètre de longueur* et *un millimètre* de diamètre. Le calcul précédent indique comment cette transformation peut être faite.

Tableau des résistances spécifiques des métaux à la température de 12°,5.

	Recuit.	Écroui.
Cuivre	1,0000	1,0264
Argent	0,9144	0,9785
Or	1,3969	1,4202
Cadmium	»	3,7210
Zinc	»	3,7841
Palladium	»	6,5420

	Recuit.	Écroui.
Étain	»	6,6957
Fer	7,4667	7,5422
Plomb	»	11,0906
Platine	11,2240	11,3701
Mercure à 14°	50,7521	

Ce tableau nous montre que l'écrouissage augmente la *résistance spécifique* des métaux : les recherches de MM. Pouillet et Ed. Becquerel ont prouvé qu'il en est de même de la chaleur. Il résulte, en effet, de leurs travaux que, toutes choses égales d'ailleurs, la résistance d'un fil métallique donné devient plus considérable à mesure que sa température s'élève, et que la dilatation éprouvée par le conducteur, en cas pareil, n'est pas suffisante pour rendre compte de la variation observée. Par conséquent, lorsqu'un circuit métallique est échauffé par le passage d'un courant électrique, il devient, par cela même, moins bon conducteur.

M. Ed. Becquerel a déduit de ses recherches les *coefficients* d'augmentation de résistance des conducteurs métalliques pour un degré d'élévation de leur température. Les nombres suivants sont extraits du tableau qu'il a publié dans son mémoire.

Mercure	0,001040
Platine	0,001861
Or	0,003397
Zinc	0,003675
Argent	0,004022
Cadmium	0,004040
Cuivre	0,004097
Plomb	0,004349
Fer	0,004726

Tout récemment, M. Matthiessen (1) a publié un travail important sur la détermination des résistances des métaux, des alcalis et des terres alcalines. En conservant toujours l'*unité* de résistance déjà adoptée, on déduit de ses recherches les valeurs suivantes des *résistances spécifiques* de ces métaux :

Sodium.....	2,4430	à la température de	21°,7
Magnésium.....	3,5901	—	17°,0
Calcium.....	4,1301	—	16°,8
Potassium.....	4,3856	—	20°,4
Lithium.....	4,8147	—	20°,0
Strontium.....	13,6214	—	20°,0

D'après les recherches de M. Matthiessen, la résistance du potassium et du sodium, qui augmente d'ailleurs à mesure que leur température s'élève, est beaucoup plus considérable à l'état liquide qu'à l'état solide. Pour le sodium, il y a un saut brusque dans la marche de la résistance à la température de fusion 93°,4 ; pour le potassium, il y a une variation très rapide entre les températures de 47 et 57 degrés, mais point de saut brusque.

M. Matthiessen, confirmant une observation de M. Matteucci, a vu que la résistance du bismuth *fondu* est *plus faible* que celle du bismuth *solide* ; il a obtenu un résultat analogue avec l'alliage fusible de Rose. Il n'est pas inutile de faire observer, à ce sujet, que le bismuth et l'alliage fusible de Rose *se contractent tous les deux par la fusion.*

A une température peu élevée, le verre laisse passer le courant électrique ; il résulte des recherches de M. Buff (2)

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1857, t. L, p. 192.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1854, t. XLII, p. 125.

que, contrairement à ce que nous avons dit des métaux, la résistance du verre diminue dans les rapports suivants, à mesure qu'on l'échauffe :

Température du verre chauffé.	Résistances relatives.
200°	258,2
250°	158,3
300°	16,8
350°	11,8
400°	8,4

M. Ed. Becquerel a aussi déterminé la *résistance* que divers liquides opposent au courant électrique. Continuant à adopter la même *unité* de mesure, nous avons déduit de ses recherches le tableau suivant :

Tableau des résistances spécifiques des liquides.

	Température.	Résistance spécifique.
Cuivre recuit	0°	1
Eau saturée de sulfate de cuivre	9°,25	16885520
Eau saturée à 9°,25 de chlorure de sodium	13°,40	2903538
Eau saturée d'azotate de cuivre	16°,00	10174486
Eau saturée de sulfate de zinc	11°,40	15861267
Dissolution de 30 gr. d'iodure de potassium dans 250 gr. d'eau distillée	12°,50	8171384
Acide sulfurique étendu au 1/11e	19°,00	1032020
Acide azotique ordinaire	13°,1	976000
Eau 120 c. c. / Acide chlorhydrique 100 — / Protochlorure d'antimoine 30 gr.	15°	817066
Eau distillée	»	675420800 (1)

(1) Ce nombre est déduit du travail de M. Pouillet. Ce physicien attribue à l'eau distillée une *conductibilité* 400 fois plus petite, et par suite une *résistance* 400 fois plus grande que celle d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre.

Généralement, à mesure que les dissolutions salines se rapprochent de leur point de saturation, leur *résistance spécifique* diminue. L'azotate de cuivre, le sulfate de zinc et quelques autres sels déliquescents extrêmement solubles donnent lieu à des phénomènes plus complexes. Le *minimum* de résistance de leurs dissolutions correspond à un certain degré de concentration qui n'est pas la saturation. A partir de ce point, la résistance devient plus considérable, soit qu'on augmente, soit qu'on diminue la proportion du sel dans la dissolution.

A l'inverse de ce que nous avons vu précédemment pour les métaux, l'élévation de température diminue la résistance spécifique des liquides. Il résulte des recherches de M. Ed. Becquerel que, pour certains liquides tels que la solution saturée de sulfate de cuivre, la solution étendue de sulfate de zinc, et l'acide azotique ordinaire, cette influence de la chaleur est tellement considérable, qu'à la température de 100 degrés, leur résistance spécifique n'est plus que le *tiers* ou le *quart* de ce qu'elle était à *zéro*.

§ II. — Résistances au passage.

Au moyen d'une lame de platine, partageons en deux cellules une auge de verre remplie d'un électrolyte quelconque, et traversée par un courant. Bien que la résistance du métal soit moindre que celle du liquide dont il prend la place dans le circuit, l'intensité du courant éprouve, au moment de l'introduction du diaphragme métallique, un affaiblissement facile à constater. Ce phénomène, signalé en 1825 par M. De la Rive (1), a été

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e sér., 1825, t. XXVIII, p. 303.

étudié depuis par MM. Matteucci, Marianini, Poggendorff, Lenz, Marié, Ed. Becquerel, Gaugain, etc. Le courant électrique, au moment où il passe d'un conducteur liquide à un conducteur solide, ou d'un conducteur solide à un conducteur liquide, éprouve donc une résistance qui diminue son intensité.

Le même affaiblissement doit nécessairement être produit par les lames métalliques qui servent à transmettre le courant aux liquides ; une résistance du même ordre doit se développer aux surfaces de séparation de l'électrolyte et des deux électrodes positive et négative. M. De la Rive a publié, sur ce sujet, une observation très intéressante (1). Ayant successivement chauffé, avec une lampe à alcool, les deux électrodes de platine qui servaient à faire passer le courant dans de l'eau légèrement acidulée, il remarqua que l'élévation de température de l'électrode positive n'exerçait aucune influence sur l'intensité du courant, tandis que l'échauffement de l'électrode négative déterminait un accroissement notable de cette intensité. Cette expérience de M. De la Rive tend à établir que l'élévation de température facilite beaucoup le passage du courant d'un électrolyte à un métal, et reste sans influence sur son passage du métal à l'électrolyte.

M. Matteucci (2) a étudié le cas où les deux électrodes n'ont pas la même étendue superficielle. Il a prouvé que, si la plus grande surface est du côté de l'électrode négative, la perte au passage est plus faible qu'avec la disposition inverse.

(1) *Bibl. univers. de Genève*, 1837, t. VII, p. 388.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 1837, 2e série, t. LXVI, p. 298.

Nous devons à M. Matteucci (1) une expérience très concluante, et très propre à mettre en évidence la résistance opposée par un diaphragme métallique au passage de l'électricité. Dans un canal de bois rempli d'un liquide conducteur, plaçons une boîte de 2 centimètres de largeur sur 10 centimètres de longueur; les côtés les plus longs sont de bois, les côtés perpendiculaires à l'axe du canal sont deux plaques de platine parallèles aux électrodes qui servent à transmettre le courant au liquide. La boîte et le canal sont remplis du même électrolyte. Quand le circuit est fermé, le courant peut passer à droite et à gauche de la boîte, et dans la boîte elle-même en traversant les deux diaphragmes de platine qui la terminent. — Cela fait, plongeons, dans le liquide extérieur à la boîte, les deux extrémités de l'un des fils d'un galvanomètre différentiel, et, dans le liquide de la boîte, les deux extrémités de l'autre fil du même galvanomètre; d'ailleurs, ces deux systèmes de sondes galvanométriques doivent être symétriquement placés par rapport à la ligne qui joint les deux pôles. Si le courant passe à la fois dans le liquide de la boîte et dans le liquide extérieur, les fils du galvanomètre différentiel sont traversés par des courants *dérivés* de sens inverses, et la déviation de l'aiguille aimantée traduit la différence de leurs intensités. — D'après les observations de M. Matteucci, on trouve toujours une certaine déviation en faveur du système des sondes qui plongent dans le liquide extérieur à la boîte; et si, quand l'angle de déviation ne varie plus, on enlève

(1) *Bibl. univers. de Genève*, 1839, t. XXI, p. 166.

les deux sondes plongées dans le liquide de la boîte, la position de l'aiguille reste *constante*. — Cette expérience prouve évidemment que le courant ne passe pas dans le liquide de la boîte. Au lieu de traverser les diaphragmes de platine, le courant de la pile s'incurve latéralement à la surface de séparation du liquide et de la première lame métallique, pour passer *tout entier* à travers l'électrolyte environnant.

Quand un liquide est introduit dans un circuit voltaïque, l'affaiblissement du courant dépend donc non-seulement de la *résistance propre* du liquide interposé, mais encore de cette résistance spéciale appelée *résistance au passage* dont nous venons de constater l'existence à la surface de séparation des électrolytes et des lames métalliques. Des faits exposés et des principes développés à propos des actions électro-chimiques (t. I, chap. III, p. 498), il est facile de déduire les causes véritables de ces *résistances au passage*.

Soient P, N (Fig. 284), deux lames de platine employées

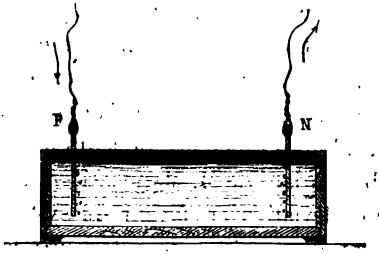


Fig. 284.

comme électrodes, dans la décomposition de l'eau. La surface de l'électrode positive P se recouvre d'une couche

adhérente d'oxygène, la surface de l'électrode négative N se recouvre d'une couche semblable d'hydrogène, et les deux électrodes sont *polarisées*. Il se développe ainsi, dans l'appareil, une force électromotrice dirigée de N en P. Cette force électromotrice de *polarisation* lutte évidemment contre le courant transmis par les électrodes, et constitue une *résistance active* qui tend à affaiblir son intensité.

L'ensemble des deux électrodes *polarisées* P, N, représente donc un véritable *couple secondaire*, dont l'action commence avec la décomposition de l'eau, continue tant que dure l'électrolysation, et se perpétue, même après l'interruption du courant transmis, jusqu'à l'entier épuisement des couches gazeuses accumulées sur les lames P, N.

Quel que soit l'électrolyte placé dans le circuit d'un courant, les électrodes de platine, *polarisées* par les produits de la décomposition, représentent un *couple secondaire*, dont la force électromotrice est opposée à celle du courant que ces lames métalliques sont destinées à transmettre au liquide.

Il résulte de là que, si les électrodes et l'électrolyte sont choisis de manière à éviter toute *polarisation* et tout dépôt de matières étrangères à la surface des lames métalliques, il ne doit plus y avoir de *résistance au passage*, et l'affaiblissement du courant déterminé par l'introduction de l'électrolyte dans le circuit doit être représenté *en entier* par la *résistance propre* du liquide employé.

L'exactitude de cette proposition est confirmée par l'expérience suivante empruntée au travail de M. Ed.

Becquerel, sur la mesure des *résistances au passage* (1).

Employons des lames de *zinc* comme électrodes, dans l'électrolysation d'une dissolution de *sulfate de zinc*. L'acide sulfurique et l'oxygène mis en liberté autour de l'électrode positive se combinent avec le zinc, et du zinc métallique se précipite sur l'électrode négative. Evidemment, il n'y a ni polarisation des électrodes, ni aucun dépôt de matières étrangères à leur surface. Les déterminations de M. Ed. Becquerel prouvent que, dans ce cas, *la perte d'intensité au changement de conducteur est nulle*, et l'affaiblissement du courant est représenté *en entier* par la *résistance propre* de la dissolution saline.

Cela posé, il est facile de comprendre le rôle joué par un diaphragme métallique placé sur le trajet d'un courant dans un électrolyte.

Entre les deux électrodes P, N, plaçons (Fig. 285) un diaphragme de platine D, et supposons que l'électrolyte

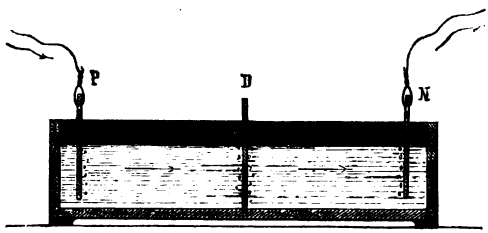


Fig. 285.

employé soit de l'acide sulfurique étendu d'eau. La face *a* du diaphragme D joue le rôle d'électrode négative par rapport à la lame P, et la face *b* du même diaphragme

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1847, t. XX, p. 68.

est une électrode positive par rapport à la lame métallique N. La face *a* se recouvre donc d'une couche adhérente de bulles d'hydrogène, et la face *b* d'une couche semblable de bulles d'oxygène. Les quatre faces métalliques en présence sont donc *polarisées ;* leur ensemble représente *deux couples secondaires* (P, *a*) (*b*, N), dont les forces électromotrices sont, toutes deux, dirigées de N en P, et s'ajoutent pour lutter contre le courant transmis par les électrodes P, N.

Avant l'interposition du diaphragme D, il n'y avait que deux couches gazeuses adhérentes l'une en P, l'autre en N, et le courant n'avait à surmonter que la résistance d'un *seul couple secondaire* (P, N); après l'interposition du diaphragme D, il y a *quatre* couches gazeuses adhérentes, chaque face du diaphragme D est polarisée en même temps que les électrodes P, N, et le courant, pour traverser l'électrolyte, est obligé de surmonter la résistance de *deux couples secondaires* concordants (P, *a*) (*b*, N).

Il résulte de cette analyse que : chaque diaphragme métallique interposé dans l'électrolyte développe une *résistance au passage* représentée par la résistance d'un couple secondaire, dont la force électromotrice est opposée à celle du courant transmis par les électrodes.

Mais, indépendamment de cette force électromotrice de polarisation, les couches gazeuses accumulées à la surface des électrodes opposent à la transmission du courant une *résistance passive*, dont l'effet s'ajoute à celui de la force électromotrice contraire.

M. Ed. Becquerel (1) a fait une étude détaillée des

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1847, t. XX, p. 53.

pertes d'intensité éprouvées par les courants au moment où ils changent de conducteurs. Dans le procédé employé par M. Ed. Becquerel, on mesure directement, dans chaque cas particulier, la *totalité de la résistance au passage*. L'analyse précédente des phénomènes qui accompagnent la transmission d'un courant à travers un électrolyte quelconque, nous a montré que cette *résistance totale* se compose elle-même de la *résistance passive* des couches adhérentes aux lames métalliques, et d'une *résistance active* créée par la *force électromotrice de polarisation de ces électrodes*.

M. Gaugain (1) a aussi étudié les effets de la *résistance au passage*; mais il s'est exclusivement occupé de la mesure de la *résistance active*, ou de la force électromotrice développée par la polarisation des électrodes de platine employées dans l'électrolysation d'une solution aqueuse très étendue d'acide sulfurique. Nous devons nous contenter de rapporter, sous forme de propositions, les principaux résultats de son travail.

1° La force électromotrice de polarisation des électrodes va croissant avec la *durée* de l'électrolysation. Dans beaucoup de cas, il faut prolonger la décomposition de l'eau pendant une heure pour que cette force atteigne son *maximum*.

2° Quand le courant est assez énergique pour produire un *dégagement abondant* de gaz, l'intensité du courant peut varier du simple au décuple, sans que la valeur de la force électromotrice de polarisation éprouve une modification notable.

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1855, t. XLI, p. 1164.

3° Quand le dégagement des gaz est *très faible ou à peine sensible*, l'intensité de la force électromotrice de polarisation augmente avec celle du courant.

4° Le *maximum* de la force électromotrice de polarisation varie avec la température et quelques autres circonstances ; il ne paraît pas être très éloigné du nombre 350. M. Gaugain a pris pour *unité* la force électromotrice d'un couple thermo-électrique, bismuth et cuivre, dont les soudures étaient maintenues l'une à *zéro* et l'autre à *cent* degrés.

Dispositions qui permettent de plonger toutes les lames métalliques d'une pile voltaïque dans une même auge remplie de liquide actif. — Ce que nous venons de dire des *résistances* créées par les écrans métalliques placés sur le trajet d'un courant nous permet d'expliquer le mécanisme de la pile de Muncke, et de quelques autres combinaisons voltaïques dans lesquelles les lames métalliques, au lieu d'être maintenues par paires dans des bocaux distincts et isolés, sont toutes plongées dans une seule auge remplie de liquide actif.

Soit V (Fig. 286) une auge de bois remplie d'acide sulfurique étendu d'eau ; dans cette auge plongent trois couples voltaïques composés de lames de zinc et de cuivre parallèles et fixées à une traverse de bois horizontale. Les boutons métalliques K, K', communiquent, l'un avec la première lame de cuivre C, l'autre avec la dernière lame de zinc Z''. — La lame de zinc Z, attaquée par l'acide sulfurique, devient le point de départ d'un courant qui peut se diriger indifféremment, à travers le liquide, soit vers la lame de cuivre C, soit vers la lame de cuivre C'.

Mais, arrivé en C, le courant aurait à surmonter la résistance du circuit interpolaire et de la pile tout entière; tandis que, pour revenir de C′ à son point de départ Z, ce courant ne rencontre que la *résistance négligeable* des communications métalliques établies entre les parties supérieures des lames Z, C′. L'électricité suit nécessaire-

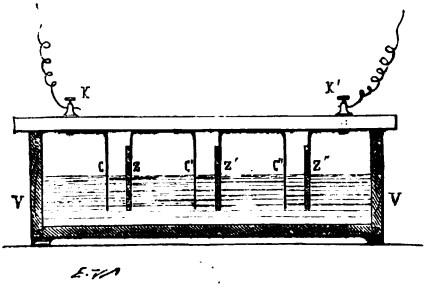


Fig. 286.

ment ce dernier trajet, et le courant créé par la dissolution du zinc Z, au lieu de parcourir le circuit interpolaire, chemine tout entier de Z en C′ à travers le liquide, et de C′ en Z à travers les communications métalliques des parties supérieures de ces lames. — Par les mêmes raisons, le courant produit par la dissolution de zinc Z′, au lieu de marcher vers C′ et de passer par le circuit interpolaire, chemine tout entier de Z′ en C″ à travers le liquide, et de C″ en Z′ à travers les communications métalliques des parties supérieures de ces lames. — Dans cette pile voltaïque de trois couples, les deux lames extrêmes Z″, C; sont seules disposées d'une manière convenable pour fournir de l'électricité à l'arc conjonctif. Elles représentent, en effet, un couple dont

le circuit est fermé d'un côté par la pile, et de l'autre côté par le fil interpolaire ; mais, à cause de la très grande résistance de son circuit, il est évident que ce couple unique Z″, C, ne peut fournir à l'arc conjonctif qu'un courant *extrêmement faible*.

Ainsi, quand une pile voltaïque ordinaire est plongée dans une auge *unique* remplie d'eau acidulée, les éléments métalliques *intermédiaires* se partagent en autant de couples *fermés sur eux mêmes* qu'il y a de groupes de deux lames voisines, zinc et cuivre, réunies par leurs parties supérieures. Chacun de ces circuits voltaïques indépendants est traversé par un courant partiel qui ne fournit rien à l'arc conjonctif, et reste tout entier dans l'appareil. Il ne passe à travers le fil interpolaire que le courant, *nécessairement très faible*, du couple unique constitué par la plaque terminale de zinc et par la lame terminale de cuivre.

Sans rien changer à la disposition des couples, plaçons

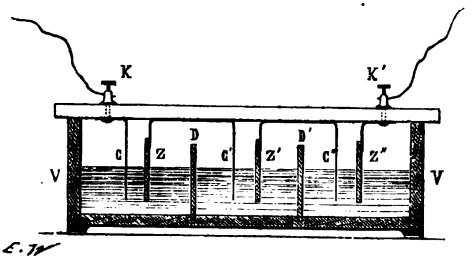


Fig. 287.

(Fig. 287) un premier diaphragme de verre D entre la lame Z et la lame C′, et un second diaphragme de verre D′ entre la lame Z′ et la lame C″. Évidemment, l'électricité

ne peut plus passer de Z en C', ni de Z' en C''; dès lors les courants produits par la dissolution des trois lames de zinc marchent de Z en C, de Z' en C', de Z'' en C'', se superposent, et forment un courant unique dirigé de K en K' à travers l'arc interpolaire. L'interposition des deux diaphragmes de verre D, D', partage l'auge V en trois auges partielles maintenant les trois couples complétement isolés, et ce cas rentre évidemment dans celui où les couples plongent dans des bocaux de verre séparés.

Mais, pour empêcher l'électricité produite par la dissolution des lames de zinc de se partager en courants partiels circulant dans l'intérieur de l'appareil, et pour la faire passer tout entière à travers l'arc interpolaire sous forme d'un seul courant, il n'est pas nécessaire que les diaphragmes D, D', soient des lames isolantes; il suffit qu'ils opposent assez de résistance au courant pour l'empêcher de passer de Z en C' et de Z' en C''. Ce but peut parfaitement être atteint en remplaçant les lames de verre D, D', par des lames métalliques.

Supposons, en effet, que les diaphragmes D, D', soient des lames métalliques. Le courant produit par la dissolution du zinc Z peut indifféremment, à travers le liquide, se porter soit vers C, soit vers D. Mais, arrivé en D, ce courant devrait décomposer l'eau pour aller de D en C', et le courant d'*un seul couple voltaïque* n'est pas assez intense pour opérer l'électrolysation de l'eau acidulée. Ce courant, ne pouvant plus traverser le circuit Z, C', se dirige nécessairement de Z en C, et passe tout entier par l'arc interpolaire. Par la même raison, le diaphragme métallique D' empêche l'électricité produite par la dissolution

de Z de traverser le circuit Z', C', et force ce second courant à marcher dans le même sens que le premier, à travers le conducteur interpolaire.

Il reste donc établi que, pour empêcher l'établissement de courants partiels dans l'intérieur d'une pile voltaïque plongée dans une *seule* auge, pour imprimer une même orientation à tous les mouvements électriques produits par la dissolution des lames de zinc, et les transformer en un courant unique tout entier dirigé à travers le circuit interpolaire, il suffit de placer des *diaphragmes métalliques* entre les éléments de chaque groupe de deux lames, zinc et cuivre, qui sont en communication par leurs parties supérieures.

Il résulte évidemment de cette dernière considération que, sans affaiblir sensiblement l'intensité du courant

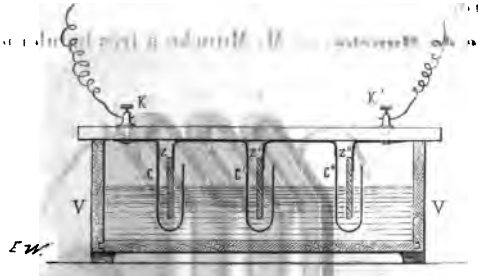


Fig. 288.

d'une pile de Wollaston, on peut se dispenser d'avoir un bocal distinct par chaque couple, et plonger l'appareil tout entier (Fig. 288) dans une *seule* auge remplie de liquide actif. En effet : — La portion recourbée de la lame de cuivre C est un véritable diaphragme placé entre Z et C' ;

ce diaphragme ne permet pas au courant produit par la dissolution de zinc Z de passer de Z en C', et l'oblige à suivre le trajet du circuit interpolaire. — De même, la portion recourbée de la lame C' oppose au courant produit par la dissolution de Z' une résistance suffisante pour l'empêcher de passer de Z' en C'', et l'obliger à suivre le trajet du circuit interpolaire.

Lorsque la pile de Wollaston est plongée dans une *seule* auge remplie d'eau acidulée, la portion recourbée de chaque lame de cuivre joue donc le rôle d'un diaphragme placé entre les métaux hétérogènes de deux couples successifs. La résistance créée par ces diaphragmes est suffisante pour imprimer une orientation commune à tous les mouvements électriques, et déterminer le *sens définitif* d'un courant unique dirigé à travers l'arc interpolaire.

Pile de Muncke. — M. Muncke a très habilement pro-

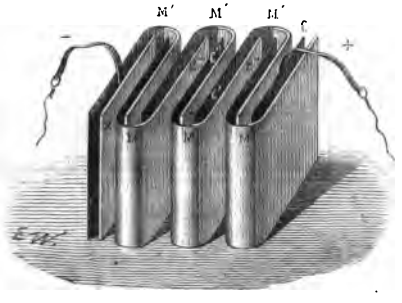


Fig. 289.

fité des propriétés des diaphragmes métalliques pour construire une pile voltaïque très commode, très puissante,

et dont les couples sont tous plongés dans une même auge remplie d'eau acidulée.

Cette pile (Fig. 289) se compose de deux séries M, M, M, et M′, M′, M′, de doubles lames, zinc et cuivre, emboîtées les unes dans les autres, et placées de manière que toutes les soudures soient verticales. De cet emboîtement réciproque, il résulte qu'une lame de zinc quelconque Z′ de la série M′, M′, M′, est placée entre deux lames de cuivre qui n'ont avec elle aucune communication métallique, et dont l'une, C′, appartient à la même série M′, M′, M′,

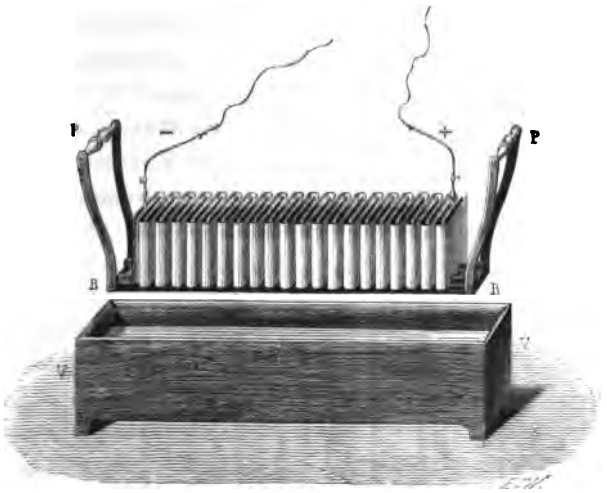


Fig. 290.

tandis que l'autre, C″, appartient à la série M, M, M. De même, une lame quelconque de zinc Z″ de la série M, M, M, est placée entre deux lames de cuivre sans communica-

tion métallique avec elle, et appartenant l'une à la série M, M, M, l'autre à la série M′, M′, M′. L'appareil est complété au moyen d'une lame terminale de zinc Z et d'une lame terminale de cuivre C, qui n'ont aucune communication métallique ni avec la série M, M, M, ni avec la série M′, M′, M′ ; la lame isolée Z est le pôle *négatif*, et la lame isolée C le pôle *positif* de l'appareil.

La Figure 290 représente une pile de Muncke, telle qu'on la construit habituellement. Les bords inférieurs des lames métalliques sont logés dans des rainures horizontales, parallèles, pratiquées dans une traverse de bois B, B ; de petits tasseaux de bois, introduits entre les lames, servent à les assujettir par leurs bords supérieurs, et à les maintenir isolées ; deux poignées P, P, fixées à la traverse de bois B, B, permettent de soulever et de manier l'appareil. — Une auge étroite de bois V, bien mastiquée à l'intérieur, contient le liquide actif dans lequel on plonge cette pile pour la mettre en action.

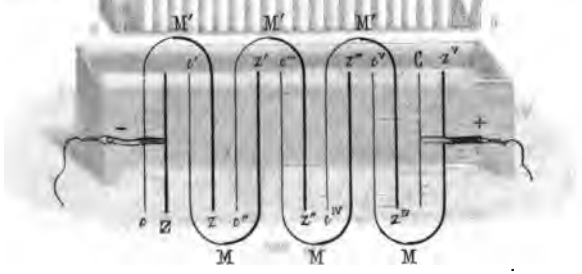


Fig. 291.

Une projection horizontale (Fig. 291) permet de bien comprendre le mécanisme de cette pile. — L'ensemble

des lames métalliques de la série M', M', M', et des deux lames terminales isolées Z, C, constitue *quatre* couples voltaïques (Z, c), (z, c''), (z'', c^{iv}), (z^{iv}, C) tous plongés dans le même liquide. De plus, chacun de ces quatre couples est séparé du couple voisin par les lames de la série M, M, M, disposées en *diaphragmes métalliques*. Les quatre couples de la série M', M', M', bien que plongés dans une même auge, agissent donc comme une pile dont le pôle *positif* est en C et le pôle *négatif* en Z. — De même, l'ensemble des lames métalliques de la série M, M, M, et des deux lames terminales isolées Z, C, constitue quatre couples voltaïques (Z, c'), (z', c'''), (z''', c^{v}), (z^{v}, C) tous plongés dans le même liquide. De plus, ces quatre couples sont maintenus isolés les uns des autres par les lames de la série M', M', M', disposées en *diaphragmes métalliques*. Les quatre couples de la série M, M, M, bien que plongés dans une même auge, agissent donc aussi comme une pile dont le pôle *positif* est en C, et le pôle *négatif* est en Z.

En résumé, grâce à la manière dont les deux séries de doubles lames métalliques s'emboîtent réciproquement, la pile de Muncke est composée de deux systèmes de couples métalliques dont l'action est de même sens ; les lames métalliques du système M', M', M', jouent le rôle de diaphragmes isolants par rapport aux couples du système M, M, M, et réciproquement, les lames métalliques du système M, M, M, sont des diaphragmes isolants pour les couples du système M', M', M' ; la lame de cuivre isolée C sert de pôle *positif* à ces deux systèmes de couples, et la lame de zinc isolée Z leur sert de pôle *négatif*. — La

pile est traversée par deux courants de *même sens*, dirigés tous deux de Z en C, l'un à travers le liquide et les arcs M′, M′, M′, l'autre à travers le liquide et les arcs M, M, M. — Ces deux courants se superposent et s'ajoutent, pour former, dans l'arc interpolaire, un courant unique dirigé de C en Z.

Sous un très petit volume, la pile de Muncke contient un très grand nombre d'éléments métalliques; elle est très facile à manier, et fournit un courant d'une très grande intensité; mais les lames métalliques se polarisent en très peu de temps, et le courant s'affaiblit très rapidement.

MM. Young et Faraday ont construit des piles voltaïques qui ont la plus grande analogie avec celle de Muncke, et dont les couples sont aussi tous plongés dans une seule auge remplie de liquide actif. Les mêmes considérations servent à se rendre compte de la marche du courant dans tous ces appareils, dont le mécanime repose sur les propriétés des diaphragmes métalliques, et qui ne diffèrent les uns des autres que par quelques détails de construction.

Du reste, quelle que soit la disposition adoptée, quand tous les couples de la pile plongent dans une même auge, il s'établit, à travers le liquide environnant, des communications latérales entre les éléments voltaïques successifs. Il en résulte que, dans tous les cas, une partie de l'électricité développée par la dissolution du zinc ne passe pas par le circuit interpolaire, et circule, dans l'intérieur de l'appareil, sous forme de *courants dérivés*.

Pour diminuer ces pertes d'intensité inévitables, il

faut rendre difficile l'établissement de ces communications latérales et de ces courants dérivés ; on atteint ce but en plaçant le liquide actif dans une auge étroite, dont les dimensions transversales sont très peu supérieures à celles des lames métalliques de la pile.

§ III. — Expressions des résistances d'un circuit électro-dynamique.

Tout circuit électro-dynamique se compose de deux parties distinctes, l'électromoteur et le conducteur interpolaire. Chacun de ces éléments du circuit oppose un obstacle à la transmission de l'électricité, et la *somme* de leurs résistances partielles est la *résistance totale* que le courant doit surmonter pour traverser le système tout entier. Les expressions générales de la résistance de l'électromoteur et de la résistance de l'arc interpolaire se déduisent facilement des notions précédemment développées.

Résistance de l'électromoteur. — La résistance d'un couple hydro-électrique dépend à la fois de ses éléments constitutifs, et de la polarisation des lames métalliques. Laissant de côté, pour le moment, les phénomènes de polarisation, nous n'avons à nous occuper que de la résistance propre des métaux et des liquides qui entrent dans la combinaison voltaïque.

Les lames métalliques sont à la fois très larges et très courtes ; pour cette double raison, elles opposent au courant électrique une résistance tellement faible, qu'on peut, sans erreur sensible, la négliger complétement, et ne tenir compte que de celle des liquides. Dès lors, la ré-

sistance du couple dépend des trois circonstances suivantes : la nature, la section transversale et l'épaisseur de la couche liquide qui sépare les deux lames métalliques. Soient :

k, la résistance spécifique du liquide actif ;

D, la distance qui sépare les lames métalliques ;

S, la surface immergée de chaque lame métallique.

D et S représentent l'épaisseur et la section transversale de la couche liquide que le courant doit traverser pour passer d'une lame à l'autre. D'après les lois connues de la résistance des conducteurs solides et liquides, la résistance R du couple hydro-électrique est donnée par l'équation suivante :

$$R = k\frac{D}{S}.$$

Il résulte de cette expression générale que :

1° Lorsque les lames métalliques immergées sont maintenues à la même distance D et conservent la même étendue superficielle S, la résistance R du couple hydro-électrique est *directement* proportionnelle à la résistance spécifique k du liquide actif interposé.

2° Lorsque le liquide actif interposé reste le même, la résistance R du couple hydro-électrique est *directement* proportionnelle à la distance D qui sépare les lames métalliques, et *inversement* proportionnelle à l'étendue de leur surface immergée S.

Dès lors, il est évident que deux couples de dimensions inégales et composés des mêmes, éléments métalliques et liquides, opposeraient la même résistance au courant,

si le rapport $\frac{D}{S}$ restait constant. Mais, dans la pratique, les couples de dimensions inégales diffèrent beaucoup par l'étendue de la surface S des lames immergées, et très peu par la distance D qui les sépare; il en résulte nécessairement que la résistance des grands couples hydro-électriques est moins considérable que celle des petits couples de même nature, parce que le rapport $\frac{D}{S}$ est lui-même plus faible dans les premiers que dans les seconds.

Une pile hydro-électrique n'étant qu'une série de couples placés à la suite les uns des autres, sa *résistance totale* est égale à la somme des résistances des éléments électromoteurs dont elle se compose. Ces considérations suffisent pour établir que la *résistance totale* d'un électromoteur est directement proportionnelle au nombre des couples associés.

Il ne faut pas croire cependant que la méthode précédente puisse permettre de calculer avec exactitude la valeur de cette *résistance totale*. En effet, il règne toujours beaucoup d'incertitude sur l'étendue de la surface immergée et la distance des lames métalliques; d'autre part, quand le nombre des couples associés est considérable, la résistance de l'ensemble des lames métalliques n'est plus négligeable; enfin, il est à peu près impossible de se mettre à l'abri des altérations de composition des liquides, et des phénomènes de polarisation des lames métalliques. Pour toutes ces causes réunies, la *résistance totale* d'un électromoteur ne peut pas être directement calculée; elle doit être déterminée expérimentalement.

Dans le paragraphe premier de l'article troisième de ce chapitre, à propos de l'étude des lois des intensités des courants, nous donnerons une méthode simple et facile pour effectuer cette détermination expérimentale.

Dans un couple thermo-électrique, la résistance, toujours très faible, dépend uniquement de la nature et des dimensions des métaux hétérogènes associés. Par conséquent, si nous appelons k, L, S, la résistance spécifique, la longueur et la section transversale de l'un des éléments métalliques associés, et k', L', S', la résistance spécifique, la longueur et la section transversale de l'autre élément métallique, la résistance R du couple est représentée par l'équation suivante :

$$R = k\frac{L}{S} + k'\frac{L'}{S'}.$$

D'où il résulte que :

1° Dans les couples thermo-électriques de mêmes dimensions, la *résistance totale* varie dans le même sens que les résistances spécifiques k, k', des métaux hétérogènes associés.

2° Dans des couples thermo-électriques composés de métaux de même nature, la *résistance totale* varie dans le même sens que les longueurs L, L', et en sens inverse des sections transversales S, S', des éléments métalliques associés.

La *résistance totale* d'une pile thermo-électrique est évidemment égale à la somme des résistances des couples associés en série. Mais, pour les piles thermo-électriques pas plus que pour les piles hydro-électriques, cette *résistance totale* ne peut être directement calculée ; elle doit

être expérimentalement déterminée par la méthode que nous exposerons plus tard.

Longueur réduite d'un électromoteur. — Un électromoteur quelconque, hydro-électrique ou thermo-électrique, étant donné, nous verrons bientôt qu'on peut toujours déterminer la *longueur* que devrait avoir un *fil normal*, pour que sa résistance propre fût égale à celle de l'électromoteur. D'après ce que nous avons dit page 5, cette *longueur de fil normal* est la *longueur réduite* de l'électromoteur, ou la mesure de la *résistance totale* que cet électromoteur oppose au *courant électrique*.

De la conductibilité. — Dans leurs recherches sur les lois expérimentales des courants électriques, Davy, M. Becquerel (1), M. Pouillet (2), etc., au lieu de considérer les *résistances* des conducteurs, solides ou liquides, placés sur le trajet des courants, se sont surtout occupés de la détermination de leurs *conductibilités*. Cette dernière quantité est, dans quelques cas rares, d'un emploi plus commode que la *résistance*.

La conductibilité électrique d'un corps quelconque est la propriété inverse de sa résistance à la propagation d'un courant voltaïque : c étant la *conductibilité spécifique* et k la *résistance spécifique* d'un conducteur solide ou liquide, ces deux quantités sont nécessairement liées par la relation suivante :

$$c = \frac{1}{k}, \qquad \text{ou bien } k = \frac{1}{c}.$$

(1) *Annal. de chim. et de phys.*, 2e sér., 1826, t. XXXII, p. 420.
(2) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1837, t. IV, p. 267 et 785.

Dès lors, dans les tableaux des résistances spécifiques des conducteurs (pages 13 et suiv.), il n'y a qu'à renverser tous les rapports pour en déduire les conductibilités spécifiques correspondantes.

Il résulte des recherches des physiciens qui ont directement déterminé la *conductibilité* des diverses substances solides et liquides, que :

La *conductibilité* d'un corps quelconque est directement proportionnelle à sa section transversale, et inversement proportionnelle à sa longueur.

De cette loi on déduit que :

c étant la conductibilité spécifique d'un corps ;

l, la longueur de ce corps ;

s, sa section transversale ;

la *conductibilité totale* C de ce corps est représentée par l'expression suivante :

$$C = c\frac{s}{l}.$$

Or, nous avons vu (page 12) que l'expression de la *résistance totale* R de ce corps est

$$R = k\frac{l}{s}.$$

Puisque $c = \frac{1}{k}$, il résulte de ces deux expressions de C et de R que la *conductibilité totale* C et la *résistance totale* R d'un corps quelconque sont liées par la relation suivante :

$$C = \frac{1}{R}, \qquad \text{ou bien } R = \frac{1}{C}.$$

Résistance du circuit interpolaire. — Les notions développées dans le paragraphe précédent conduisent facilement à l'expression générale de la *résistance totale* du circuit interpolaire tout entier, ou de la *résistance partielle* d'une portion quelconque, solide ou liquide, de ce circuit. En effet, soient :

k, la résistance spécifique d'une portion de ce circuit interpolaire ;

l, la longueur de cette portion du circuit ;

s, sa section transversale.

La *résistance partielle* r que cette portion du circuit oppose à la transmission du courant, exprimée en *unités* de résistance, est évidemment

$$r = k\frac{l}{s}.$$

Une suite d'opérations semblables permet de calculer les résistances partielles r, r', r'', r''',... r^n des diverses parties, solides et liquides, du circuit interpolaire. Or, évidemment, la *résistance totale* R de ce circuit est égale à la somme des *résistances partielles* des diverses portions dont il se compose, et nous aurons

$$R = r + r' + r'' + r''' + \ldots + r^n.$$

Cette question peut être présentée sous une autre forme. Au lieu de la *résistance totale*, on peut demander la *longueur réduite* du circuit interpolaire. Prenons une longueur λ de fil normal telle que

$$\lambda = k\frac{l}{s}.$$

Cette longueur λ de fil normal opposerait au cou-

rant la même résistance que la portion du circuit primitivement considérée, et dont la résistance est r. λ serait donc la *longueur réduite* de cette portion du circuit, et pourrait lui être substituée sans qu'il survînt aucune perturbation dans le mouvement électrique. Une série d'opérations analogues permet de déterminer les *longueurs réduites* λ, λ', λ'', λ''',... λ^n des diverses portions de ce circuit interpolaire.

Si donc nous appelons Λ la *longueur réduite* du circuit interpolaire tout entier, ou la mesure, en longueur de fil normal, de sa résistance totale, la valeur de Λ est nécessairement fournie par l'équation suivante ;

$$\Lambda = \lambda + \lambda' + \lambda'' + \lambda''' + \ldots + \lambda^n.$$

La *résistance* et la *longueur réduite* d'un circuit ont donc des valeurs numériquement identiques ; et cela devait être, puisque, sous des formes de langage différentes, ces deux expressions représentent une même quantité, l'obstacle que le courant doit surmonter pour traverser le circuit. Étant connue la résistance spécifique, la longueur et la section transversale de chaque portion du circuit, il est toujours possible de déterminer la *résistance totale* ou la *longueur réduite* de ce circuit.

Résistance totale d'une partie ramifiée du circuit interpolaire. — Quelquefois le circuit interpolaire est composé, dans une partie de son étendue, d'un certain nombre de conducteurs distincts. Ainsi, dans la Figure 292, par exemple, le circuit est bifurqué entre le point a et le point c. En a, le courant rencontre deux fils conducteurs ; il se partage en deux portions, dont

l'une suit le trajet *abc*, tandis que l'autre se dirige suivant *adc*. Arrivés en *c*, ces deux courants partiels se réunissent, et ne forment plus qu'un seul courant dans

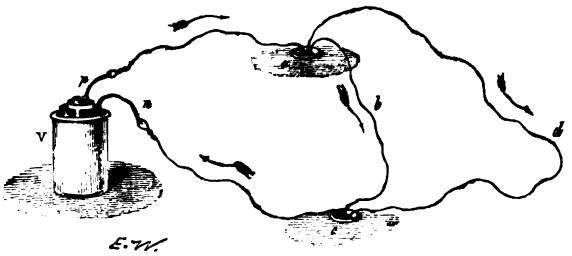


Fig. 293.

le reste, *cn*V*pa*, du circuit. Dans ce cas, il est nécessaire de connaître la résistance totale que l'électricité doit surmonter pour se rendre de *a* en *c*, à travers les deux fils *abc*, *adc*, réunis. Soient :

r', la résistance du fil *abc*,
r'', la résistance du fil *adc*.

D'après ce que nous avons dit plus haut des relations qui existent entre la conductibilité et la résistance d'un conducteur quelconque :

c', conductibilité du fil *abc*, est égal à $\frac{1}{r'}$,

c'', conductibilité du fil *adc*, est égal à $\frac{1}{r''}$.

Évidemment, les deux fils *abc*, *adc*, réunis, ont pour l'électricité une conductibilité totale c qui satisfait à la relation suivante :

$$c = c' + c'' = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} = \frac{r' + r''}{r' r''}.$$

Par conséquent, la résistance totale r des deux fils *abc*, *adc*, réunis, est

$$r = \frac{1}{c} = \frac{1}{c' + c''} = \frac{r' r''}{r' + r''}.$$

Si nous désignons par λ', λ'', les *longueurs réduites* de chacun des deux fils *abc*, *adc*, la *longueur réduite* λ de la portion du circuit constituée par l'ensemble de ces deux fils est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{\lambda' \lambda''}{\lambda' + \lambda''}.$$

En d'autres termes, λ représente une *longueur de fil normal* telle que, sans changer les conditions du mouvement électrique dans le circuit électro-dynamique, on peut la substituer aux deux fils *abc*, *adc*.

Pour considérer le problème dans toute sa généralité,

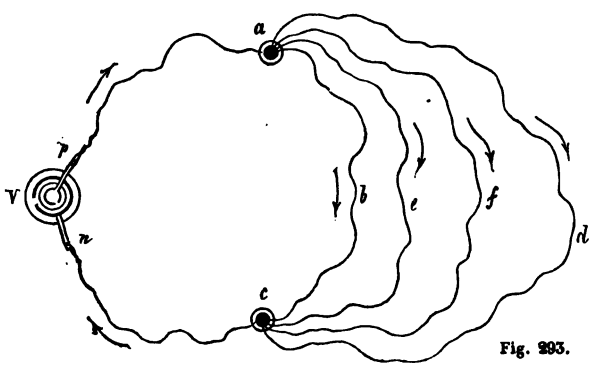


Fig. 293.

supposons (Fig. 293) qu'il y ait *quatre* fils conducteurs *abc*, *aec*, *afc*, *adc*, tendus entre le point *a* et le point *c*. Soient :

r', r'', r''', r^{IV}, les résistances respectives de ces quatre conducteurs ;
λ', λ'', λ''', λ^{IV}, leurs longueurs réduites respectives.

En appliquant à ce cas les raisonnements précédents, nous aurons :

1° Pour valeur de la *résistance totale* r des quatre conducteurs réunis :

$$r = \frac{r' r'' r''' r^{IV}}{r' r'' r''' + r' r'' r^{IV} + r' r''' r^{IV} + r'' r''' r^{IV}}.$$

2° Pour valeur de la *longueur réduite* λ de la portion du circuit constituée par ces quatre conducteurs réunis :

$$\lambda = \frac{\lambda' \lambda'' \lambda''' \lambda^{IV}}{\lambda' \lambda'' \lambda''' + \lambda' \lambda'' \lambda^{IV} + \lambda' \lambda''' \lambda^{IV} + \lambda'' \lambda''' \lambda^{IV}}.$$

Ces expressions générales de la *résistance totale*, et de la *longueur réduite* de l'ensemble des conducteurs qui servent à opérer la division d'un courant entre deux points quelconques de son circuit, nous seront d'une grande utilité dans la recherche des lois des *courants dérivés*.

ARTICLE II.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS.

Les appareils généralement employés pour mesurer l'intensité des courants électriques sont de deux ordres : les *rhéomètres*, et les *voltamètres*. — Dans tout *rhéomètre*, galvanomètre, boussole des sinus, ou boussole des tangentes, le courant traverse un circuit métallique et exerce son action sur une aiguille aimantée ; l'intensité du courant est déduite de l'angle de déviation de l'aiguille aimantée. — Un *voltamètre* est un appareil qui permet de recueillir les produits de la décomposition déterminée par

le passage d'un courant à travers un électrolyte. Dans ce cas, le poids des éléments séparés dans un temps donné et l'intensité du courant sont deux quantités directement proportionnelles.

§ Ier. — Rhéomètres.

Galvanomètre. — Le galvanomètre indique directement l'existence et le sens d'un courant électrique. Il est évident que, lorsque plusieurs courants sont successivement dirigés à travers le circuit d'un même galvanomètre, les déviations observées de l'aiguille doivent varier dans le même sens que les intensités. Mais les angles de déviation de l'aiguille aimantée ne sont pas proportionnels aux intensités des courants transmis; on ne peut donc employer le galvanomètre comme moyen exact de mensuration qu'à la condition de construire, à l'avance et pour chaque instrument, une table qui donne l'*intensité* correspondante à chacune des déviations observées. Pour dresser ces tables d'intensités, plusieurs méthodes ont été proposées par MM. Becquerel, Nobili, Melloni, Poggendorff, etc. Depuis que, comme appareil de mensuration, le galvanomètre a été remplacé par la boussole des sinus et la boussole des tangentes, cette question a beaucoup perdu de son importance; cependant il nous paraît convenable de donner ici la méthode expérimentale suivie par Melloni (1).

Soit A (Fig. 294) une pile thermo-électrique garnie de ses tubes. Vis-à-vis de ses faces et sur son axe de

(1) *La thermocrose*, 1re partie. Naples, 1850, p. 56.

figure, on place deux lampes à flamme constante L, L′ ; entre les lampes et les faces correspondantes sont disposés les écrans métalliques E, F. Dans cet état, les faces de la

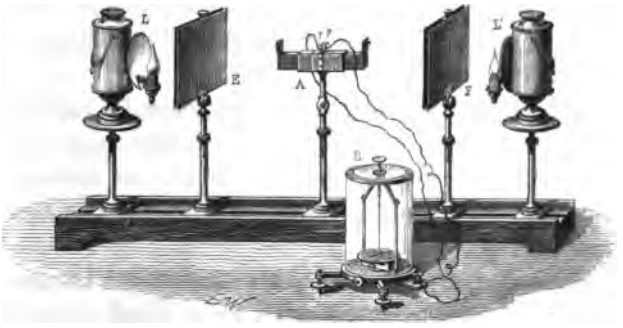


Fig. 294.

pile sont à la même température, et, si l'on met les pôles P, P, en communication avec le galvanomètre G, l'aiguille aimantée reste fixe à *zéro*.

Cela fait, on abaisse l'écran E. La lampe L agit *seule* sur la face correspondante de la pile, l'aiguille du galvanomètre est chassée *à droite*, par exemple, et l'on donne à la lampe L une position telle que la déviation soit de 15°. On relève alors l'écran E, et l'aiguille retombe à *zéro*.

On renverse l'ordre des contacts P, P, de la pile et du galvanomètre, et l'on abaisse l'écran F. La lampe L′ agit *seule* à son tour sur la face correspondante, et le sens de la déviation est nécessairement le même que dans l'essai précédent. On donne à la lampe L′ une position telle que la déviation soit de 14°. On relève l'écran F, l'aiguille retombe à *zéro*, et l'on rétablit les contacts P, P, dans l'ordre primitif.

Si maintenant on abaisse les deux écrans E, F, les deux lampes L, L', rayonnent librement *à la fois* vers les deux faces de la pile. L'aiguille est sollicitée par deux forces opposées, dont l'une peut la dévier de 15° à droite, et l'autre de 14° à gauche. La plus intense prévaut, l'aiguille est déviée de 1° à droite.

L'expérience démontre que, pour toutes les positions comprises entre *zéro* et 15°, la déviation finale déterminée par l'action simultanée des deux lampes est égale à la différence des déviations correspondantes à leurs actions isolées. Il en résulte que :

Entre *zéro* et 15°, les intensités des courants transmis sont directement proportionnelles aux angles de déviation de l'aiguille aimantée.

Il n'en est plus de même quand l'aiguille s'écarte de plus de 15° de sa position initiale. — Supposons que, la lampe L agissant *seule*, l'aiguille s'arrête à 30°. Renversons l'ordre des contacts P, P, et donnons à la lampe L' une position telle que son action *isolée* pousse et maintienne l'aiguille à 29°.— Après avoir rétabli les contacts tels qu'ils étaient primitivement, abaissons les deux écrans et faisons agir les deux lampes *à la fois*. La déviation finale traduit nécessairement la différence des deux forces. L'action de la lampe L prévaut ; mais la déviation est de *plus* de 1°, et cette déviation est la mesure de l'intensité nécessaire pour pousser l'aiguille du *vingt-neuvième* au *trentième* degré de la division.

On prend pour *unité d'intensité* la force capable de pousser l'aiguille de *zéro* à 1° et de la maintenir dans cette position. En étudiant, par la méthode précédente,

les divers degrés du cadran, on peut déterminer les véritables rapports des forces nécessaires pour maintenir l'aiguille du galvanomètre dans les diverses positions d'écartement angulaire, et dresser une table des intensités correspondantes à toutes les déviations de l'aiguille entre *zéro* et 90°.

Boussole des sinus. — Dès 1824, M. De la Rive (1) avait indiqué le principe sur lequel repose cet appareil. Mais c'est M. Pouillet (2) qui, le premier, l'a appliqué à la mesure des intensités des courants électriques.

Dans cet appareil (Fig. 295), AA est une boîte à boussole de déclinaison ; *ab* est une aiguille de déclinaison très mobile sur son centre de suspension ; *cd* est un index de bois très léger fixé à angle droit sur l'aiguille, qui se meut avec elle et permet d'en déterminer la position à un moment quelconque de l'expérience. Le cercle vertical de cuivre BB a de 30 à 35 centimètres de diamètre ; son centre coïncide avec le point de suspension de l'aiguille *ab*, et le plan de sa section médiane passe par le *zéro* du limbe gradué de la boîte à boussole AA. Le cercle BB est creusé d'une gorge qui sert à enrouler un gros fil de cuivre *t t'* recouvert d'une enveloppe isolante de soie. Ce fil de cuivre sert à conduire le courant qui doit agir sur l'aiguille, et dont on veut mesurer l'intensité. Suivant le degré de sensibilité qu'on veut donner à l'appareil, le fil *t t'* fait un ou plusieurs tours dans la gorge du cercle. L'axe vertical de l'appareil passe par le centre de suspen-

(1) *Mém. de la Société de phys. et d'hist. nat. de Genève*, t. III, 1re partie, p. 117.

(2) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1836, t. III, p. 786.

sion de l'aiguille *ab*. Toute la portion du pied de l'appareil située au-dessous du cercle horizontal CC est immobile. Le cercle BB est mobile autour de son axe vertical ; il entraîne, dans son mouvement, l'axe D, la boîte à bousole AA, le niveau à bulle d'air *h* et une alidade *f* qui indi-

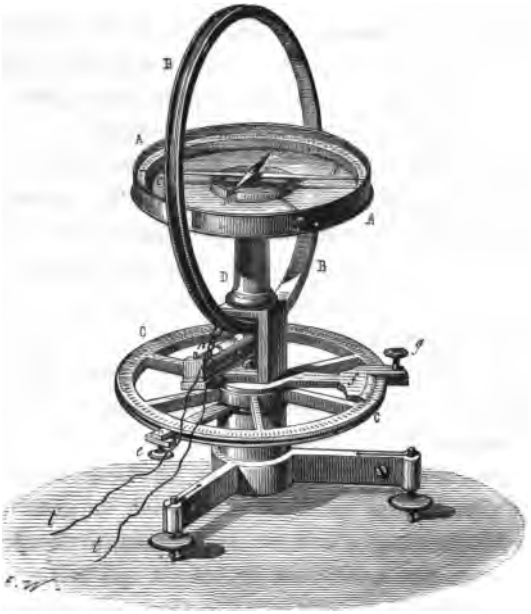


Fig. 295.

que, sur le cercle horizontal CC préalablement rendu fixe, les déviations imprimées au cercle BB. Le limbe du cercle horizontal CC est creusé d'une gorge dans laquelle s'engage une pince *e* fixée, par un rayon de cuivre horizontal, à la portion immobile du pied de l'appareil. Quand la

pince *e* est serrée, le cercle CC a une position fixe; quand, au contraire, la pince *e* est desserrée, le cercle CC peut tourner librement autour de l'axe vertical de l'appareil. L'alidade *f* porte, à son extrémité externe, une pince *g* qui s'engage dans la gorge du cercle CC; suivant que cette pince *g* est serrée ou desserrée, la partie supérieure de l'appareil est solidaire ou indépendante du cercle CC.

Pour faire une observation, on commence par rendre l'axe de l'appareil vertical, au moyen des trois vis calantes sur lesquelles repose son pied. On fait ensuite tourner le cercle BB jusqu'à ce que sa section médiane soit dans le plan de l'aiguille *ab* ou du méridien magnétique; dans cette position, l'extrémité de l'index *cd* marque 90° sur le limbe gradué de la boîte AA. On desserre la pince *e*, on fait tourner le cercle horizontal CC jusqu'à ce que le *zéro* de sa graduation corresponde à la ligne de repère de l'alidade *f*, puis on serre la pince *e*. Dans cet état, l'appareil est orienté et préparé pour une observation.

Mettons l'extrémité du fil *tt'* en communication avec les pôles d'un électromoteur. L'aiguille *ab* est déviée. On fait alors tourner le cercle BB de manière à maintenir constamment l'axe de l'aiguille dans le plan de sa section médiane. Quand l'aiguille *ab* est parvenue à sa position d'équilibre, elle est dans le plan du cercle BB, son extrémité est sur le *zéro* de la graduation du limbe de la boîte AA, et l'extrémité de l'index *cd* marque nécessairement 90° sur ce limbe. L'écartement angulaire imprimé à l'aiguille par le courant a la même étendue que le mouvement de rotation imprimé au cercle BB; l'un et

l'autre ont pour mesure l'arc parcouru par l'alidade *f* sur le cercle horizontal CC qui, retenu par la pince *e*, a nécessairement conservé une position fixe pendant toute la durée de l'opération.

Si nous appelons *f* la *force* avec laquelle la terre sollicite l'aiguille aimantée à revenir dans le plan du méridien magnétique lorsqu'elle en est écartée de 90°, nous savons que, pour une déviation angulaire *d*, cette *force directrice* est horizontale, perpendiculaire à l'axe de l'aiguille et égale à $f \sin d$ (vol. I, p. 256). Mais, puisque l'aiguille *ab* de la boussole est toujours contenue dans le plan vertical du courant circulaire qui agit sur elle, l'action totale du courant est aussi une force horizontale et perpendiculaire à l'axe de l'aiguille. Lorsque l'aiguille a atteint sa position finale de déviation, l'action du courant et celle de la terre, se faisant équilibre, sont nécessairement deux forces égales et de signes contraires.

Lorsque deux courants sont successivement dirigés à travers le fil $t\,t'$ de ce rhéomètre, leurs intensités i, i', sont donc dans le même rapport que les *sinus* des angles de déviation d, d', de l'aiguille *ab*.

Boussole des tangentes. — M. Pouillet (1) a imaginé cet appareil, et s'en est servi, le premier, pour mesurer les intensités des courants électriques.

Au moyen d'un banc de bois KK (Fig. 296) et parallèlement au plan du méridien magnétique, on fixe un ruban circulaire de cuivre LL, de 40 à 50 centimètres de diamètre, de 2 centimètres de largeur et de 2 millimètres

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1837, t. IV, p. 267.

d'épaisseur. Ce ruban est entouré d'un fil de soie; ses deux extrémités recourbées verticalement restent isolées l'une de l'autre, et plongent dans deux vases de verre pleins de mercure V, V', qui servent à les mettre en com-

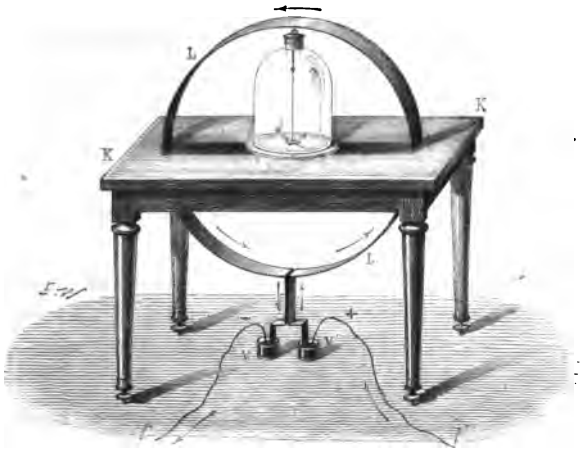


Fig. 296.

munication avec les pôles d'une pile. Au centre de figure du cercle est suspendue, par un fil sans torsion, une aiguille *courte et massive a*. Un index très léger de cuivre ou de bois *d*, fixé perpendiculairement à l'axe de l'aiguille, indique sur un limbe horizontal gradué les mouvements angulaires de l'aimant.

Lorsque le courant passe, l'aiguille est déviée. En raison de la largeur du ruban de cuivre LL et du peu de longueur de l'aiguille, la résultante des actions exercées par le courant cylindrique sur ses pôles est toujours, à très peu près, perpendiculaire au méridien magnétique.

Si donc nous appelons i l'intensité du courant, ou son action sur l'aiguille placée dans le plan du méridien magnétique, cette action deviendra $i \cos d$, lorsque l'aiguille aura atteint une déviation angulaire d. Mais, dans cette position, la force directrice de l'aiguille, égale et opposée à l'action du courant, est $f \sin d$. Nous aurons donc :

$$i \cos d = f \sin d;$$

d'où

$$i = f \frac{\sin d}{\cos d},$$

d'où, enfin :

$$i = f \operatorname{tang} d.$$

Avec ce rhéomètre, les intensités des courants successivement dirigés à travers un circuit sont dans les mêmes rapports que les tangentes des angles de déviation de l'aiguille aimantée.

Dans ces derniers temps, M. Gaugain (1) a modifié d'une manière fort heureuse la construction de la boussole des tangentes. Il s'est appuyé sur le théorème suivant déduit par M. Bravais de la formule d'Ampère :

« Si l'on soumet une aiguille aimantée à l'action d'un » courant circulaire placé dans le plan du méridien ma- » gnétique, et que le centre de l'aiguille occupe le som- » met d'un cône droit ayant pour base le courant cir- » culaire, les tangentes des déviations de l'aiguille sont » presque rigoureusement proportionnelles aux inten- » sités, quand la hauteur du cône est égale *au quart* du » diamètre de la base. »

(1) *Annal. de chim et de phys.*, 3e sér., 1854, t. XLI, p. 66.

M. Gaugain s'est assuré, par des expériences directes, qu'avec des aiguilles de 30 à 35 millimètres de longueur et des courants circulaires dont le rayon est au moins *triple* de la longueur de l'aiguille, si les conditions énoncées dans ce théorème sont remplies, la limite des écarts ne dépasse pas $\frac{1}{1300}$, quantité tout à fait négligeable dans la pratique. On peut donc ainsi construire des boussoles des tangentes à la fois très exactes et très sensibles, dont le diamètre ne dépasse pas 18 à 22 centimètres.

Dans ces nouvelles boussoles des tangentes (Fig. 297), l'aiguille aimantée, son index et son cercle horizontal di-

Fig. 298.

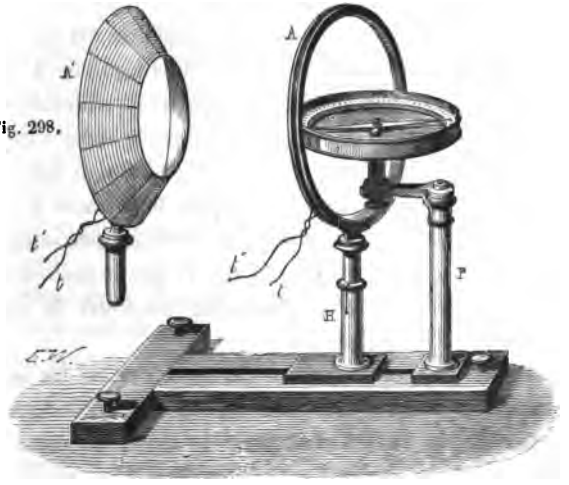


Fig. 297.

visé sont portés sur un pied P que l'on peut, à volonté, éloigner ou rapprocher du cadre circulaire A, autour duquel est enroulé le fil métallique *tt'* entouré d'une enve-

loppe isolante de soie, et destiné à conduire le courant. Le point de suspension de l'aiguille est sur une horizontale menée par le centre du cadre A perpendiculairement à sa section médiane, et à une distance de ce centre égale *au quart* du diamètre du courant circulaire. Il est toujours facile d'orienter l'appareil, et de placer ses diverses pièces aux distances convenables.

M. Gaugain, partant des mêmes principes, a construit des *multiplicateurs des tangentes* qui peuvent servir à mesurer exactement les intensités de courants extrêmement faibles. En effet, pour une position déterminée de l'aiguille aimantée, le lieu géométrique de tous les cercles propres à former des boussoles des tangentes est un cône droit dont le sommet est au centre de l'aiguille, et dont l'angle est déterminé, puisque le rapport de sa hauteur à sa base est connu. Si donc on enroule sur la surface de ce cône un fil de cuivre recouvert de soie, et si l'on fait passer un courant, chaque tour de spire imprimera à l'aiguille une déviation dont la tangente sera proportionnelle à l'intensité du courant. Il est évident que le *multiplicateur conique* formé par la réunion de ces tours de spire jouira de la même propriété.

Pour transformer la *boussole des tangentes* en un *multiplicateur des tangentes*, il suffit de détacher le cercle A de son pied H, et de lui substituer le tronc de cône A′ (Fig. 298) sur la surface extérieure duquel on a enroulé un fil fin *tt′* enveloppé de soie. Ces multiplicateurs coniques sont d'un emploi commode et d'une très grande sensibilité. Le centre de suspension de l'aiguille doit toujours occuper le sommet du tronc de cône A′.

Les modifications introduites par M. Gaugain dans la construction des rhéomètres rendent ses appareils très supérieurs à tous ceux qui avaient été employés avant lui.

§ II. — Voltamètres.

Un *voltamètre* est un appareil à décomposition, dans lequel les produits de l'électrolyse sont recueillis et mesurés. En mettant de côté les écarts insensibles dus à la conductibilité physique des liquides, il résulte des lois de l'action *définie* des courants (vol. Ier, p. 519) que, si un *même* électrolyte est soumis, successivement et pendant un même espace de temps, à l'action de deux courants, les intensités i, i', sont proportionnelles aux poids p, p', des portions décomposées de cet électrolyte, ou seulement d'un des éléments mis en liberté. L'eau acidulée avec l'acide sulfurique est le liquide généralement employé dans le voltamètre ; on se sert quelquefois de la dissolution aqueuse d'un sel métallique tel que le sulfate de cuivre.

Voltamètre à eau acidulée. — Tout vase disposé de manière à recueillir les gaz provenant de l'électrolysation de l'eau peut servir de voltamètre. La Figure 299 représente le voltamètre à eau tel qu'on le construit généralement pour les cours de physique. Les boutons métalliques P, P', servent à établir les communications de l'appareil avec les pôles de la pile, et les cloches de verre graduées C, D, à recueillir les gaz.

Comme la quantité d'eau décomposée, et par suite l'intensité du courant, se déduit des volumes des gaz re-

cueillis, il faut se mettre à l'abri de toutes les causes qui pourraient entraîner une perte. Ainsi, on doit choisir pour électrodes des substances conductrices chimiquement inactives en présence de l'oxygène et de l'hydrogène; généralement on emploie des plaques ou des fils de pla-

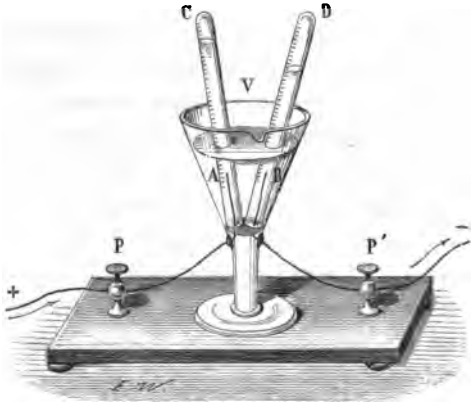


Fig. 299.

tine. Il faut aussi disposer l'appareil de manière à recueillir l'oxygène et l'hydrogène séparés; sous l'influence du platine ces gaz se recombineraient en proportions plus ou moins considérables, s'ils étaient mélangés. Ces précautions permettent de construire des voltamètres à eau acidulée, dont la marche est à très peu près régulière; mais elles ne suffisent pas pour obtenir des résultats parfaitement comparables.

M. De la Rive s'est particulièrement occupé (1) de l'action de l'oxygène dégagé dans l'électrolyse de l'eau

(1) *Arch. de l'électricité*, 1841, t. I, p. 196.

acidulée sur les électrodes de platine. Il a prouvé que les lames et les fils de platine, comme d'ailleurs les lames et fils d'or ou de palladium, sont attaqués par l'oxygène à l'état naissant, et se recouvrent d'une légère couche d'oxyde. Cet oxyde est facilement réduit par l'hydrogène; aussi, quand les électrodes de platine ont servi à conduire des courants alternatifs, elles se recouvrent d'une poudre noirâtre provenant de la désagrégation qu'éprouve la surface du métal sous l'influence de ces oxydations et de ces réductions successives. Dans l'électrolyse, l'oxydation du platine est favorisée par la présence d'une proportion plus ou moins considérable d'oxygène ozonisé. Indépendamment des gaz qui peuvent être retenus *physiquement* à la surface des électrodes de platine, une certaine quantité d'oxygène est donc fixée sur l'électrode positive sous forme d'oxyde de platine insoluble à froid dans l'eau acidulée. Ces lames de platine, recouvertes d'une couche d'oxyde réductible par l'hydrogène, sont fortement polarisées; elles ont la propriété de déterminer très promptement la combinaison des gaz, quand on les plonge dans un mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène. On comprend ainsi comment, lorsque les produits de l'électrolyse sont recueillis dans une même cloche, les gaz dégagés se recombinent en partie sous l'influence des lames de platine ; il devient alors impossible d'apprécier exactement la quantité d'eau décomposée.

Pendant l'électrolyse, il se forme toujours de l'eau oxygénée autour de l'électrode positive; il résulte, en effet, des expériences de M. Meidinger (1), que l'eau électrolysée

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1854, t. XXV, p. 170.

a la propriété de décomposer énergiquement l'iodure de potassium. La production de cette eau oxygénée entraîne ce résultat que, généralement, la quantité d'oxygène recueillie autour de l'électrode positive est trop faible pour représenter la moitié du volume de l'hydrogène dégagé autour de l'électrode négative. Les expériences de M. Meidinger montrent que cette perte d'oxygène est favorisée par l'abaissement de la température, l'intensité du courant et une plus forte proportion d'acide ajoutée à l'eau, toutes circonstances qui facilitent la production de l'eau oxygénée. Le même physicien a observé que, quand l'électrode positive est un simple fil de platine, la quantité d'oxygène qui reste dissoute dans le liquide augmente, en général, à mesure que la longueur de ce fil diminue. Cependant cette augmentation cesse pour un certain raccourcissement du fil, au delà duquel le dégagement d'oxygène va au contraire en augmentant.

Mais l'eau oxygénée se répand dans le liquide électrolysé, et finit par se trouver en présence de l'hydrogène libre. Il arrive alors qu'une partie de l'hydrogène mis en liberté à la surface de l'électrode négative, au lieu de se dégager dans l'éprouvette, est absorbée par le liquide et ramenée à l'état d'eau. Les résultats de M. Meidinger montrent que cette dernière action perturbatrice est d'autant plus intense que la surface de l'électrode négative a elle-même plus d'étendue. La production de l'eau oxygénée ne peut pas être complétement évitée; cependant le voltamètre à eau acidulée fournit des indications très précises sur la valeur de l'intensité d'un courant, quand on a soin de satisfaire aux conditions suivantes :

Employer de l'eau acidulée pure, qui n'ait pas encore servi, ou qui ait été dépouillée par l'ébullition du bioxyde d'hydrogène qui se forme pendant l'électrolyse ; — prendre pour électrode négative un simple fil de platine, dont la longueur soit réglée de manière à être à peu près proportionnelle à l'intensité du courant ; — enfin ne recueillir, ou du moins ne *mesurer* que l'hydrogène dégagé autour de l'électrode négative.

Les voltamètres à eau acidulée diffèrent beaucoup par leurs formes. Celui que nous reproduisons (Fig. 300)

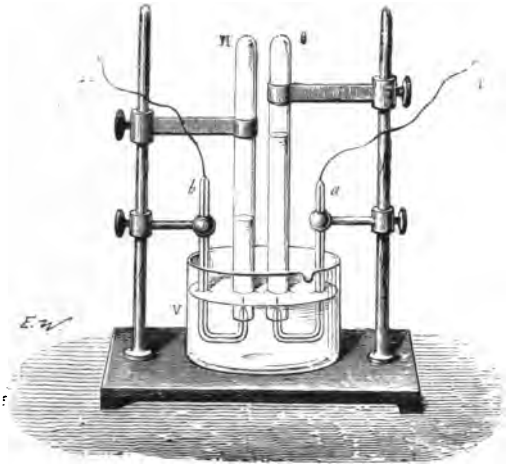


Fig. 300.

remplit toutes les conditions d'un appareil de précision ; nous l'empruntons à l'ouvrage de M. De la Rive (1).

Les éprouvettes graduées O, H, destinées à recueillir

(1) *Traité d'électricité*, t. II, p. 352.

les gaz sont pleines d'eau acidulée, et plongent, par leurs extrémités inférieures, dans le vase de verre V rempli du même liquide. Pour assurer l'isolement des fils de platine employés comme électrodes, on a soin de les envelopper, dans une partie de leur longueur, de tubes de verre fermés à la lampe et recourbés à une de leurs extrémités. Ces électrodes sont représentées en *a* et en *b*.

Les bouts libres extérieurs des fils de platine servent à établir les communications avec les pôles de la pile.

Lorsque deux courants traversent successivement le voltamètre et agissent pendant le même temps, on recueille dans le tube H des quantités d'hydrogène directement proportionnelles à leurs intensités.

Voltamètre à dissolution saline.— La décomposition des dissolutions salines peut aussi servir à mesurer l'intensité des courants. Mais, dans ce cas, il faut prendre toutes les précautions nécessaires pour se mettre complétement à l'abri des actions secondaires qui se passent entre les éléments des liquides électrolysés. La dissolution de sulfate de protoxyde de cuivre est plus particulièrement employée dans ce but. L'opération est du reste très simple. — Dans un vase de verre V rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre (Fig. 301), on plonge deux lames de platine A, B, bien décapées, que l'on met en communication avec les pôles de la pile. Avant l'immersion, on a soin de prendre bien exactement le poids de la lame B qui doit jouer le rôle d'électrode négative. Après l'opération, on essuie avec soin, on dessèche bien exactement et l'on pèse de nouveau cette lame B. L'augmentation de poids est due au dépôt de cuivre du

sel décomposé. Il résulte des lois de l'action électrolytique *définie* que, si deux courants passent successi-

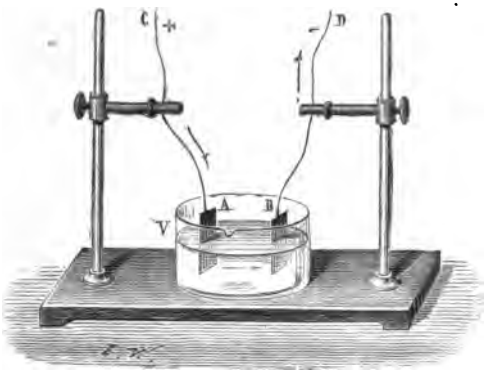


Fig. 301.

vement à travers une dissolution saturée de sulfate cuivre pendant le même temps, leurs intensités sont directement proportionnelles aux poids des dépôts de cuivre métallique recueillis sur l'électrode négative.

ARTICLE III.

LOIS DES INTENSITÉS DES COURANTS.

Dans tout appareil électromoteur en action il y a à considérer la *résistance* du circuit, et la *force électromotrice*. La *résistance* est, à proprement parler, un obstacle qui s'oppose à la transmission de l'électricité, et que le courant doit surmonter pour circuler du pôle positif au pôle négatif à travers le conducteur interpolaire, et du pôle négatif au pôle positif à travers l'appareil lui-même. La *force électro-*

motrice détermine et maintient les tensions polaires, quand l'appareil est isolé ; elle donne à l'électricité l'impulsion nécessaire pour surmonter la résistance du circuit et traverser l'ensemble du système, quand les deux pôles sont en communication. Nous avons vu, dans l'article précédent, que la *résistance* d'un conducteur quelconque est mesurée par sa *longueur réduite ;* les lettres employées pour indiquer les *résistances* d'un circuit entier ou d'une portion déterminée de ce circuit ne sont donc que les signes représentatifs des valeurs numériques de leurs *longueurs réduites.* Quant à la *force électromotrice*, nous verrons, dans l'article *cinq* de ce chapitre, comment on peut déterminer exactement sa valeur dans chaque cas particulier.

§ Ier. — Expression de l'intensité du courant.

De ces notions très simples il résulte que l'intensité d'un courant, mesurée par la quantité de travail accompli, est directement proportionnelle à la force électromotrice de l'appareil, et inversement proportionnelle à la résistance du circuit tout entier. Cela posé, soient :

R, la résistance totale d'un couple quelconque, hydro-électrique ou thermo-électrique ;

E, la force électromotrice de ce couple.

Nous avons à considérer deux cas bien distincts : celui où le circuit est fermé par le contact immédiat des pôles opposés de l'électromoteur sans interposition de conducteur additionnel, et celui où le circuit est fermé par un conducteur interpolaire quelconque.

A. **Le circuit est formé par le contact immédiat des pôles opposés de l'électromoteur.** — Si les pôles d'un couple *unique* sont mis directement en communication sans interposition de conducteur étranger, l'intensité I du courant est évidemment donnée par l'équation suivante :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Formons une pile, en associant en série un nombre quelconque n de couples *égaux* au précédent. La différence des tensions polaires, ou la force électromotrice de cette pile, est égale à nE ; d'autre part, les résistances des couples s'ajoutent aussi, et la résistance totale de l'électromoteur est égale à nR. Si donc nous fermons cette pile en mettant directement ses pôles en communication, sans interposer de conducteur étranger, l'intensité I du courant est donnée par l'équation suivante :

$$I = \frac{nE}{nR} = \frac{E}{R}.$$

Il résulte de là cette conséquence importante :

Dans le cas où le circuit est fermé par la communication directe des pôles, sans interposition de conducteur étranger à l'appareil, l'intensité du courant est complétement indépendante du nombre des couples *égaux* rangés en série ; en d'autres termes, qu'il émane d'un *seul couple* ou qu'il soit fourni par une *pile*, le courant électrique conserve toujours la même intensité.

Pour vérifier l'exactitude de cette proposition, il suffit de faire osciller une aiguille aimantée au-dessus d'une pile composée d'une réunion de couples *égaux*, et fermée

sur elle-même, sans addition de conducteur interpolaire. L'expérience démontre qu'on peut, sans altérer le nombre des oscillations exécutées par l'aiguille dans un temps donné, retirer successivement de la série un, deux, trois, quatre, etc., des couples qui la composent, et que le nombre des oscillations reste encore le même quand l'appareil électromoteur est réduit à un *seul* couple. Puisque le nombre des oscillations est invariable, la force sous l'influence de laquelle elles s'exécutent est nécessairement constante ; l'*intensité* du courant électrique est donc indépendante du nombre des couples associés en série.

Ces expressions générales nous fournissent le moyen de déterminer l'influence des dimensions des couples sur l'intensité du courant électrique.

Puisque, dans un couple fermé sur lui-même, nous avons

$$I = \frac{E}{R},$$

tant que la force électromotrice E reste *constante*, l'*intensité* du courant ne peut être altérée que par un changement survenu dans la *résistance* R.

Or, k étant la résistance spécifique du liquide actif du couple, D la distance qui sépare les lames métalliques, S l'étendue de la surface immergée de chaque lame, nous savons que

$$R = k\frac{D}{S}.$$

La substitution de cette valeur de R dans l'équation précédente nous donne, pour la valeur de l'intensité du courant :

$$I = E\frac{S}{kD}.$$

Il résulte évidemment de cette dernière équation que :

1° Dans un couple hydro-électrique de nature déterminée, l'intensité du courant est directement proportionnelle à l'étendue S des surfaces métalliques immergées, et inversement proportionnelle à la distance D qui les sépare.

2° Si, de deux couples de même nature et de dimensions inégales, le plus grand fournit un courant plus intense que le petit, cela provient uniquement de ce que le rapport de l'étendue S des surfaces métalliques immergées à la distance D qui les sépare est plus considérable dans les grands couples que dans les petits.

Quant aux combinaisons thermo-électriques, les considérations développées précédemment (page 38), rapprochées de l'expression générale $I = \frac{E}{R}$ de l'intensité du courant, nous permettent d'établir que :

Dans un couple thermo-électrique de nature déterminée, l'intensité du courant varie en sens inverse des longueurs des barreaux métalliques associés, et dans le même sens que leurs sections transversales.

B. **Le circuit est fermé par un conducteur interpolaire quelconque.** — Supposons maintenant que le circuit soit fermé à l'aide d'un conducteur interpolaire, dont la résistance soit r. Cette dernière résistance s'ajoute nécessairement à celle de l'électromoteur, et l'intensité du courant produit est donnée par les équations suivantes :

1° Dans le cas d'un couple *unique*,

$$I = \frac{E}{R + r}. \qquad (1)$$

2° Dans le cas d'une pile formée d'un nombre quelconque n de couples *égaux* au précédent,

$$I' = \frac{nE}{nR + r}. \qquad (2)$$

L'exactitude de ces expressions de l'intensité du courant peut être vérifiée expérimentalement.

Plaçons, en effet, dans le circuit interpolaire d'un couple *unique* une boussole des tangentes, et faisons varier la résistance de ce circuit. Représentons par r', r'', r''', les valeurs successives, *connues en longueur de fil de cuivre normal*, de la résistance de ce circuit interpolaire, y compris la boussole elle-même; soient, en outre, a', a'', a''', les tangentes des déviations correspondantes observées. Nous savons que ces tangentes représentent les valeurs correspondantes de l'intensité du courant fourni par ce couple *unique*. Si donc l'équation (1) est vraie, nous aurons les relations suivantes :

$$\frac{E}{R + r'} = a', \qquad \text{d'où } E = a'(R + r');$$

$$\frac{E}{R + r''} = a'', \qquad \text{d'où } E = a''(R + r'');$$

$$\frac{E}{R + r'''} = a''', \qquad \text{d'où } E = a'''(R + r''').$$

Mais, la force électromotrice E restant constante, en égalant les seconds membres de ces équations, nous devons avoir :

$$a'(R + r') = a''(R + r''), \qquad \text{d'où } R = \frac{a''r'' - a'r'}{a' - a''};$$

$$a'(R + r') = a'''(R + r'''), \qquad \text{d'où } R = \frac{a'''r''' - a'r'}{a' - a'''}.$$

Or la résistance R du couple est invariable; il faut donc que ces deux valeurs de R soient égales. L'expérience démontre, en effet, qu'il en est ainsi, et, par suite, que l'équation (1) est la véritable expression de l'intensité du courant fourni par un couple *unique*, dont le circuit est fermé par un conducteur interpolaire quelconque.

Une suite d'opérations semblables peut être faite avec une pile ou série de plusieurs couples *égaux;* et, dans ce cas, on trouve toujours la même valeur pour la quantité nR qui représente la résistance invariable de l'électromoteur. L'équation (2) est donc aussi la véritable expression de l'intensité du courant fourni par une pile, dont le circuit est fermé par un conducteur interpolaire quelconque.

Détermination de la résistance de l'électromoteur.— La nature et les dimensions des substances dont se compose le circuit interpolaire étant connues, on peut toujours, à l'aide des résistances spécifiques de ces substances, calculer la résistance totale de ce circuit, ou *sa longueur réduite.* Il n'en est pas de même de la résistance de l'électromoteur. Les équations précédentes fournissent un moyen très simple de mesurer exactement et expérimentalement cette résistance totale de l'électromoteur, qui ne saurait être calculée *à priori.*

Soient, en effet:

E, la force électromotrice invariable de l'électromoteur simple ou composé, hydro-électrique ou thermo-électrique;

R, la résistance totale invariable aussi de cet électromoteur;

r' et r'', les résistances connues de deux conducteurs interpolaires contenant une *même* boussole des tangentes, et successivement employés pour fermer le circuit ;

a', a'', les tangentes des deux déviations observées dans ces deux expériences successives.

Nous aurons nécessairement :

$$\frac{E}{R+r'} = a', \qquad \text{d'où } E = a'(R+r');$$

$$\frac{E}{R+r''} = a'', \qquad \text{d'où } E = a''(R+r'').$$

Mais, puisque la force électromotrice E est invariable, les seconds membres de ces équations sont égaux ; ce qui donne :

$$a'(R+r') = a''(R+r''),$$

$$\text{d'où } R = \frac{a''r'' - a'r'}{a' - a''}.$$

Toutes les quantités comprises dans le second membre de cette équation sont connues ; par conséquent nous connaissons aussi la valeur de la résistance totale R, ou de la *longueur réduite* de l'électromoteur.

Influence du circuit interpolaire sur l'intensité du courant. — Cela posé, revenons aux équations (1) et (2). Elles nous montrent que l'intensité d'un couple *unique* fermé par un conducteur interpolaire est

$$I = \frac{E}{R+r},$$

et que l'intensité d'une pile composée de n couples *égaux* au précédent et fermée par un conducteur interpolaire est

$$I' = \frac{nE}{nR+r}, \qquad \text{ou } I' = \frac{E}{R+\frac{r}{n}}.$$

Du moment donc que les pôles de l'électromoteur, au lieu d'être mis directement en contact, communiquent à l'aide d'un conducteur, le courant transmis par un *couple unique* est toujours plus faible que celui d'une pile; et, pour une même résistance du conducteur interpolaire, l'*intensité* du courant fourni par une pile augmente à mesure que la fraction $\frac{r}{n}$ diminue, c'est-à-dire à mesure que le nombre n de couples associés devient lui-même plus considérable. Pour vérifier expérimentalement l'exactitude de cette proposition, on peut faire osciller une aiguille aimantée sous l'influence du courant fourni par une pile dont on fait varier le nombre des couples, et dont le conducteur interpolaire reste invariable. Le nombre des oscillations exécutées dans un temps donné, et par suite l'intensité du courant, augmente et diminue en même temps que le nombre des couples associés en série.

Du moment que la résistance propre du conducteur interpolaire s'ajoute à celle de l'électromoteur lui-même, il était facile de prévoir que, par le seul fait de son introduction dans un circuit voltaïque, le courant serait nécessairement affaibli, et que, pour une série électromotrice composée d'un nombre invariable de couples d'une nature déterminée, cet affaiblissement d'intensité augmenterait avec la résistance du conducteur interpolaire. Mais, pour bien se rendre compte de l'influence de l'addition de ce conducteur, il faut surtout considérer le rapport de sa résistance propre à celle du couple *unique*, ou de la pile dont il sert à fermer le circuit.

1° *Couple unique.* — Pour représenter l'intensité du cou-

rant d'un couple *unique*, nous avons les deux relations suivantes :

Dans le cas où le couple est fermé sur lui-même :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Dans le cas où le couple est fermé par un conducteur interpolaire :

$$I' = \frac{E}{R + r}.$$

Par conséquent :

$$I : I' :: R + r : R,$$

d'où

$$I : I' :: 1 + \frac{r}{R} : 1.$$

Le rapport $\frac{r}{R}$ est donc l'expression de l'affaiblissement qu'éprouve le courant d'un couple *unique*, lorsqu'on le ferme à l'aide d'un conducteur interpolaire de résistance r.

Lorsque r est très petit par rapport à R, la fraction $\frac{r}{R}$ est elle-même très petite, et la présence du conducteur interpolaire n'affaiblit pas sensiblement l'intensité du courant électrique. Dans le cas d'un couple hydro-électrique, la résistance R de l'électromoteur est toujours très grande par rapport à la résistance r d'un conducteur *métallique ;* il en résulte que le courant peut, sans affaiblissement notable, traverser un fil métallique d'une longueur très considérable. Pour étudier de semblables courants, il y a donc avantage à employer des galvanomètres à fil fin et très long. L'affaiblissement occasionné par la résistance du fil est négligeable en présence de la

multiplication qui résulte de son enroulement, et l'appareil est d'autant plus sensible, que le nombre de circonvolutions est plus considérable.

Dans le cas d'un couple thermo-électrique, au contraire, la résistance R de l'électromoteur est toujours une quantité très petite, et la présence d'un conducteur interpolaire, même *métallique*, suffit pour affaiblir beaucoup le courant. L'étude des courants thermo-électriques doit donc être faite à l'aide de galvanomètres à fil *court* et *gros*. Avec un fil fin et long, l'affaiblissement du courant serait tellement considérable, que, malgré la multiplication produite par le nombre des circonvolutions, l'aiguille aimantée ne serait pas sensiblement influencée.

Lorsque le conducteur interpolaire contient une colonne liquide, la résistance r du circuit interpolaire, toujours très grande d'ailleurs, varie en sens inverse de l'étendue des surfaces des électrodes plongées dans le liquide, et dans le même sens que leur distance. On comprend dès lors comment le courant fourni par un seul couple hydro-électrique peut, quoique subissant un affaiblissement très notable, traverser certains liquides ; tandis qu'une couche liquide très mince suffit, en général, pour arrêter le courant émis par un couple thermo-électrique.

2° *Pile.* — Pour représenter l'intensité du courant fourni par une pile composée de n couples *égaux*, nous avons les deux relations suivantes :

Dans le cas où la pile est fermée sur elle-même, sans interposition de conducteur étranger :

$$I = \frac{nE}{nR} = \frac{E}{R}.$$

Dans le cas où le circuit de la pile est fermé par un conducteur interpolaire quelconque, dont la résistance est r :

$$I' = \frac{nE}{nR + r} = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}.$$

Par conséquent,

$$I : I' :: R + \frac{r}{n} : R;$$

d'où

$$I : I' :: 1 + \frac{r}{nR} : 1.$$

Le rapport $\frac{r}{nR}$ représente donc l'affaiblissement qu'éprouve le courant d'une pile quelconque, lorsqu'on la ferme à l'aide d'un conducteur interpolaire de résistance r.

Ainsi, pour une pile comme pour un couple unique, l'affaiblissement du courant déterminé par l'interposition d'un conducteur interpolaire ne dépend pas uniquement de la résistance de ce conducteur, mais du rapport de cette résistance à la résistance de l'électromoteur lui-même. Dans le paragraphe de ce chapitre consacré à l'association des couples *en batterie*, nous verrons comment, suivant la nature des effets à produire, on peut accroître la puissance d'une pile, tantôt en agrandissant simplement les surfaces des plaques métalliques des couples sans augmenter leur nombre, tantôt en multipliant le nombre des couples sans agrandir leurs dimensions.

§ II — De l'intensité du courant et de la force électromotrice dans les diverses sections du circuit.

De l'intensité du courant en divers points du circuit. — Lorsqu'un élément électromoteur est fermé, pour que la circulation électrique se maintienne uniforme et constante, il faut, de toute nécessité, que chaque section transversale du circuit reçoive de celle qui la précède autant d'électricité qu'elle en cède à la section qui la suit. Entre deux sections successives, il doit donc exister une différence de tension directement proportionnelle à la résistance que l'électricité éprouve à passer d'une section à l'autre. Cette différence de tension est elle-même une force électromotrice *partielle* qui joue, par rapport au mouvement de l'électricité dans une portion limitée du circuit, le même rôle que la force électromotrice *totale* de ce couple par rapport à la propagation du courant dans le circuit tout entier. Et, puisque l'intensité d'un courant a toujours pour mesure le rapport de la force électromotrice à la résistance, il en résulte que :

Dans un élément électromoteur en activité, l'intensité du courant est la même en quelque point du circuit qu'on l'observe.

Qu'on le mesure dans la portion du circuit représentée par le conducteur interpolaire, ou dans l'électromoteur lui-même, le courant d'une pile fermée composée d'un nombre quelconque de couples conserve partout la même intensité.

L'exactitude de ces propositions a été vérifiée par Ohm

lui-même et par tous les observateurs qui, depuis lui, se sont occupés de la recherche des lois des courants électriques. Cette importante vérification peut être faite à l'aide d'un des procédés indiqués plus haut pour mesurer l'intensité des courants. Ainsi, prenons (Fig. 302) une pile composée de quatre couples à force constante, dont le

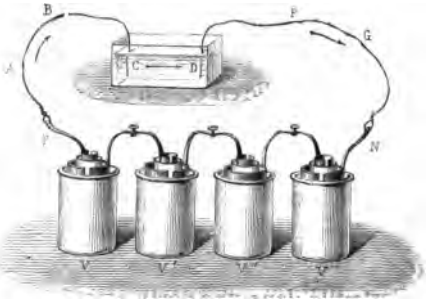


Fig. 302.

circuit est fermé par un conducteur PABCDFGN composé de fils métalliques différents les uns des autres par leur nature et leurs dimensions, et d'une colonne liquide CD.

1° Présentons successivement à divers points du circuit une aiguille aimantée suspendue à un fil de soie sans torsion, et comptons, à chaque épreuve, le nombre des oscillations exécutées. Quel que soit le point du circuit exploré, l'expérience démontre que, dans un même temps, l'aiguille exécute le même nombre d'oscillations.

2° Introduisons dans le circuit un quelconque des rhéomètres décrits page 46 et suivantes. Quel que soit le point du circuit qui serve à établir la communication,

pourvu que la résistance propre du rhéomètre reste constante, la déviation de l'aiguille aimantée est toujours la même.

3° Si nous introduisons dans le circuit un voltamètre à décomposition de l'eau, la quantité de gaz recueillie dans un temps donné reste constante, quelle que soit la position donnée à l'appareil.

Ces résultats sont indépendants du nombre des éléments voltaïques associés, ils sont donc vrais pour un couple *unique* comme pour une série de plusieurs couples.

Force électromotrice dans les diverses sections du circuit. — Dans un couple hydro-électrique, les deux faces opposées de la couche de conctact du liquide et du métal positif prennent, sous l'influence de l'action chimique, des tensions électriques dont la différence algébrique est constante. Cette différence de tension est la mesure de la force électromotrice qui détermine et maintient la circulation du courant dans le couple fermé; et, pour que cette circulation reste uniforme, il faut que, du côté du métal positif, le circuit rende à la couche d'action chimique autant d'électricité qu'elle lui en cède elle-même du côté du liquide. Mais ce circuit se compose de deux portions très distinctes : le liquide du couple, et le conducteur interpolaire; chacune d'elles, dans un temps donné, est traversée par une même quantité d'électricité. Le travail de circulation du courant peut donc aussi être décomposé en deux : l'un accompli dans le liquide du couple, et l'autre dans le conducteur interpolaire. A chacun de ces travaux correspond une force électromotrice *par-*

tielle, et ces forces *partielles* doivent nécessairement être proportionnelles aux résistances qu'elles ont à surmonter, puisque l'intensité du courant est partout la même.

Dans une pile fermée (Fig. 303), le point d'origine de la force électromotrice n'est pas *unique*. Chaque couple

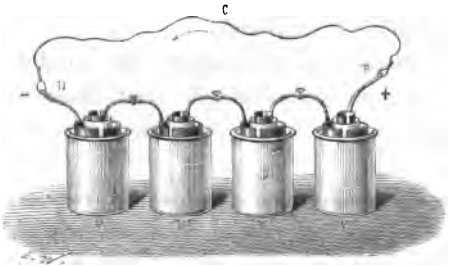


Fig. 303.

est, en réalité, un *foyer* de force électromotrice; toutes ces forces agissent dans le même sens, se superposent et s'ajoutent. Leur *résultante*, ou leur *somme*, est la force électromotrice *totale* de l'appareil, la force qui détermine et entretient la circulation de l'agent électrique dans l'ensemble du circuit. Dans la pile comme dans le couple *unique*, nous pouvons donc diviser ce travail de circulation en deux : l'un qui s'accomplit dans le conducteur interpolaire C, et l'autre dans l'appareil lui-même.

Cela posé, soient :

e, la force électromotrice partielle qui, dans la pile, pousse l'électricité du pôle négatif au pôle positif;

e', la force électromotrice partielle qui, dans l'arc conjonctif C, pousse l'électricité du pôle positif au pôle négatif;

E, la force électromotrice totale qui maintient la circulation électrique dans l'ensemble du circuit;

r, la résistance de la pile;

r', la résistance du conducteur interpolaire C;

$R = r + r'$, la résistance du circuit entier.

Nous savons que la circulation de l'agent électrique est uniforme dans le circuit tout entier, et que l'intensité du courant est partout la même; les quantités e, e', r, r', doivent donc satisfaire à la condition suivante :

$$\frac{e}{r} = \frac{e'}{r'}.$$

En désignant par I l'intensité du courant, nous avons donc :

$$I = \frac{e}{r},$$

$$I = \frac{e'}{r'};$$

d'où

$$Ir = e,$$
$$Ir' = e'.$$

L'addition, membre à membre, de ces deux dernières équations donne

$$I(r + r') = e + e'.$$

Remplaçant, dans cette dernière équation, $(r + r')$ par sa valeur R, nous avons :

$$IR = e + e'.$$

Mais, d'autre part, nous savons que :

$$IR = E;$$

donc, nécessairement,

$$e + e' = E.$$

Cette dernière équation prouve que la somme des deux forces électromotrices *partielles*, qui agissent, l'une dans la pile, et l'autre dans le conducteur interpolaire, est égale à la force électromotrice *totale*, qui imprime à l'électricité l'impulsion nécessaire pour surmonter la résistance du circuit entier.

Considérons enfin la question dans toute sa généralité; divisons le circuit total en n parties, et soient :

e', e'', e''', ..., e^n, les forces électromotrices partielles dans ces n portions du circuit ;

r', r'', r''', ..., r^n, les résistances partielles de ces n portions du circuit ;

E..., la force électromotrice totale de l'appareil ;

$R = r' + r'' + r''' + \ldots + r^n$, la résistance totale du circuit.

Puisque l'expérience, d'accord avec la théorie, prouve que l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit, en désignant par I cette intensité, nous avons

$$I = \frac{e'}{r'} = \frac{e''}{r''} = \frac{e'''}{r'''} = \ldots = \frac{e^n}{r^n};$$

d'où nous tirons :

$$\begin{aligned} Ir' &= e', \\ Ir'' &= e'', \\ Ir''' &= e''', \\ &\ldots\ldots \\ Ir^n &= e^n. \end{aligned}$$

Ajoutant, membre à membre, toutes ces équations, nous avons

$$I(r' + r'' + r''' + \ldots + r^n) = e' + e'' + e''' + \ldots + e^n.$$

Remplaçant $(r' + r'' + r''' + \ldots + r^n)$ par sa valeur R dans cette équation, nous avons

$$IR = e' + e'' + e''' + \ldots + e^n.$$

Mais, d'autre part, nous savons que :

$$IR = E;$$

donc, nécessairement,

$$e' + e'' + e''' + \ldots + e^n = E.$$

Ainsi, dans un appareil électromoteur en activité, de même que la somme des résistances partielles est égale à la résistance totale du circuit, de même la somme des forces électromotrices partielles est égale à la force électromotrice totale sous l'influence de laquelle le courant parcourt le circuit tout entier.

Nous avons dit que, si nous représentons, par e, e', et par r, r', les forces électromotrices et les résistances partielles de deux portions d'un circuit fermé, ces quatre quantités satisfont à la relation suivante :

$$\frac{e}{r} = \frac{e'}{r'}.$$

Si donc

$$r = r', \text{ nécessairement } e = e'.$$

Il résulte de là qu'à deux portions du circuit d'égale résistance correspondent toujours deux forces électromotrices partielles égales entre elles.

Tout ce que nous venons de dire des couples et des piles hydro-électriques s'applique évidemment aux couples et aux piles thermo-électriques.

Propositions générales. — Dans la théorie générale

de l'électricité dynamique telle que Ohm l'a conçue et exposée, la force électromotrice qui fait passer le courant à travers une portion quelconque d'un circuit *fermé* n'est autre chose que la différence algébrique des tensions électriques qui existent à ses extrémités. Il résulte de cette manière d'expliquer la propagation de l'électricité dynamique que :

1° Dans chaque section d'un circuit électro-dynamique *fermé*, il y a de l'électricité à l'état de tension.

2° La différence des tensions correspondantes à deux points quelconques du conducteur interpolaire est proportionnelle à la résistance que le circuit oppose, entre ces deux points, à la propagation de l'électricité.

3° La tension électrique est la même dans toute l'étendue d'une section transversale quelconque d'un circuit fermé.

4° A la surface de contact des deux *éléments actifs* du couple, il y a une variation brusque de la tension électrique.

Déjà Davy (1), dans les belles expériences qu'il fit avec la puissante pile de la Société royale de Londres, avait observé qu'en mettant les extrémités du circuit en communication avec les garnitures d'une bouteille de Leyde, cette bouteille se chargeait à l'instant, et donnait son étincelle ordinaire lorsque, après l'avoir séparée de l'appareil électromoteur, on faisait communiquer ses armures. « Le » plus court contact possible de la bouteille avec l'appa» reil voltaïque suffisait, dit-il, pour rendre au conden» sateur toute sa charge. »

(1) *Biblioth. Britannique*, 1813, t. LIII, p. 228.

En 1842, MM. Masson et Bréguet (1) prouvèrent que deux points pris sur un circuit métallique *fermé* et traversé par un courant voltaïque ont des *tensions opposées ;* le point le plus rapproché du pôle positif de la pile a une tension *positive*, et l'autre une tension *négative*. Ils parvinrent à charger un condensateur, en mettant ses deux armures en communication avec deux points différents du trajet du courant.

Enfin, M. Kohlrausch (2) a publié une très belle série d'expériences destinées à explorer, à l'aide d'un électroscope condensateur, la tension électrique des diverses sections du circuit *fermé* d'un couple. Après avoir démontré qu'une portion quelconque du circuit est positive par rapport à celle qui la suit dans le sens de la propagation du courant, et négative par rapport à celle qui la précède, il a vérifié l'exactitude des propositions précédentes déduites de la théorie générale de Ohm.

Effets de la tension électrique dans le circuit voltaïque. — Cette tension électrique des diverses sections d'un circuit métallique traversé par un courant voltaïque devient la cause de phénomènes très intéressants, que l'établissement des longues lignes télégraphiques souterraines et sous-marines a permis d'étudier sur une très grande échelle. Déjà M. Werner Siemens, dans une note publiée en 1850 (3), disait : « Le fil souterrain, avec son

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 133.

(2) *Biblioth. univers. de Genève*, 1853, t. XXII, p. 105. — *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLI, p. 362.

(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1850, t. XXX, p. 434.

» enduit isolant; représente une énorme jarre de Leyde, » qui est chargée par la pile. » Mais, c'est surtout M. Faraday qui a mis en évidence ces effets statiques déterminés par le courant voltaïque (1).

Un fil de cuivre de $1^{mm},6$ de diamètre et de 160 kilomètres de longueur était enveloppé d'une couche uniforme de gutta-percha de $2^{mm},5$ d'épaisseur, et plongé dans l'eau d'un canal. Les deux bouts du fil étaient tenus hors de l'eau, et *isolés*. M. Faraday avait, en outre, une pile *isolée* composée de 360 éléments, zinc et cuivre, chargée avec de l'eau acidulée. Une des extrémités de cette pile fut mise en communication avec le sol, et l'autre extrémité avec un des bouts du fil sous-marin par l'intermédiaire d'un galvanomètre. Immédiatement l'électricité se précipita dans le fil, et l'aiguille fut *fortement déviée;* mais, au bout de peu d'instants, la déviation diminua et l'aiguille se fixa à 5°, indiquant ainsi un faible courant permanent dû à une déperdition d'électricité par le bout *isolé* du fil sous-marin. La communication du galvanomètre avec la pile fut alors rompue, et le galvanomètre fut mis en communication avec le sol. L'aiguille fut fortement écartée de sa position d'équilibre; mais, cette fois, la déviation fut inverse de la première. La première déviation annonçait un flux d'électricité destiné à opérer la *charge* du fil sous-marin ; la seconde traduisait nettement un courant inverse, une *décharge* du même fil.

Le fil étant *chargé* comme précédemment, si l'on fixe un galvanomètre à chacune de ses deux extrémités, et si l'on

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e sér., 1854, t. XLI, p. 123. — *Biblioth. univers. de Genève*, 1854, t. XXV, p. 209.

met les deux galvanomètres en communication avec le sol, la *décharge* du fil s'opère à la fois par les deux bouts. Chacun des galvanomètres est traversé par un courant qui passe du fil dans la terre ; le milieu de la longueur du fil armé de gutta-percha est le point de départ de deux courants, dont chacun parcourt une moitié de ce fil et se dirige vers son extrémité correspondante.

Gardons une des extrémités du fil sous-marin *isolée*, faisons communiquer l'autre avec la pile, puis rompons les communications. En touchant alors avec le doigt l'une ou l'autre extrémité du long fil, on éprouve une commotion puissante. Cette commotion a une *certaine durée*, et si le contact du doigt avec le fil est instantané, on peut décomposer la commotion totale en une quarantaine de secousses successives. On peut ne toucher le fil que *cinq minutes* après avoir rompu sa communication avec la pile, la commotion est encore sensible. Après la rupture de la communication, au lieu de toucher le fil avec le doigt, on peut le mettre en rapport avec un galvanomètre qui lui-même communique avec le sol ; l'aiguille est fortement déviée. Cette déviation est même sensible lorsque, entre le moment où le fil est séparé de la pile et celui où on le fait communiquer avec le galvanomètre, on laisse écouler une *demi-heure*.

Les mêmes expériences, répétées avec un fil enveloppé de gutta-percha, *enfoui dans le sol* et de 2400 kilomètres de longueur, ont fourni les mêmes résultats.

Ajoutons enfin que M. Faraday a répété ces expériences avec un fil de 160 kilomètres de longueur recouvert de gutta-percha et laissé à l'*air libre*. Dans ce cas, tous

ces phénomènes de tension disparaissent, ou du moins deviennent complétement négligeables comparativement aux effets considérables obtenus avec des fils sous-marins et des fils placés dans la terre.

L'explication de ces phénomènes est très simple. Quand le fil recouvert de gutta-percha est plongé dans l'eau, l'électricité lancée dans le fil par la pile, en vertu de sa tension, exerce, à travers la gutta-percha, une *induction latérale* sur le liquide conducteur qui l'environne. Le métal et l'eau, séparés par la couche isolante, se conduisent comme les armures d'une bouteille de Leyde, et se chargent d'électricités contraires. Lorsque ensuite on fait communiquer une des extrémités du fil chargé avec la terre qui elle-même communique avec l'eau, on établit un *conducteur* entre les deux armures de cette bouteille de Leyde, et la décharge a lieu comme à l'ordinaire. Dans le cas du fil de 160 kilomètres de longueur, la surface extérieure du fil ou de l'armure intérieure était de 800 mètres carrés, et la surface extérieure de la gutta-percha ou de l'armure externe avait 3312 mètres carrés d'étendue. Quand le fil est enfoui dans le sol, c'est la terre elle-même qui joue le rôle d'armure extérieure, et l'explication du phénomène est la même.

Lorsque, au contraire, le fil recouvert de gutta-percha est à l'air libre, il n'y a plus de conducteur en contact avec la surface externe de la couche isolante ; l'électricité qui traverse le fil agit sans doute encore par induction latérale sur les conducteurs environnants ; mais, comme ces corps sont placés à grande distance, l'action inductrice est faible et les effets d'accumulation d'électricité à

l'état statique sont nuls ou négligeables. Cependant un long fil télégraphique aérien doit, par le même mécanisme, se charger d'électricité statique dans les portions de son trajet qui se rapprochent beaucoup de la terre, ou qui passent très près des murailles d'un grand édifice.

Enfin, M. Wheatstone (1) a repris ces expériences avec le câble destiné à établir un télégraphe sous-marin entre le port de la Spezia et l'île de Corse. Il avait ainsi à sa disposition un fil de cuivre de 1062 kilomètres de longueur, et noyé dans une masse de gutta-percha. Seulement, dans ce cas, le câble était entouré d'une hélice formée de douze gros fils de fer qui lui formaient une couverture métallique de $8^{mm},4$ d'épaisseur. Ce câble était donc une vraie bouteille de Leyde avec deux armures métalliques séparées par une substance isolante. Aussi M. Wheatstone n'a-t-il pas eu besoin de placer l'appareil dans l'eau pour reproduire les phénomènes obtenus par M. Faraday. Ce câble, replié sur lui-même dans un puits *parfaitement sec*, et mis en communication par une extrémité avec une pile de 144 éléments réunis en 12 éléments multiples, a donné tous les effets d'accumulation d'électricité statique dont nous avons déjà parlé.

Ces expériences sont très importantes : d'une part, elles prouvent que, dans toutes les sections d'un circuit électro-dynamique, il y a de l'électricité à l'état de tension ; d'autre part, elles montrent toute la généralité des phénomènes d'induction statique, en même temps qu'elles

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1856, t. XLVI, p. 121.

confirment les vues émises par M. Faraday, au sujet de la décharge et de la transmission de l'électricité dans les conducteurs.

§ III. — Lois des courants dérivés.

Étant donné un électromoteur à force constante V (Fig. 304), établissons la communication de ses deux pôles p, n, avec les coupes a, c, pleines de mercure, au moyen de

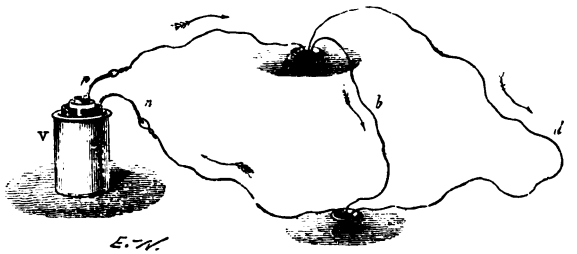


Fig. 304.

deux fils pa, nc, et complétons le circuit au moyen du fil métallique abc. Le courant parcourt le circuit $pabcnVp$; son intensité dépend de la valeur de la force électromotrice de l'appareil, et de la résistance du circuit.

Entre les coupes a et c établissons une seconde communication, à l'aide du fil métallique adc. Le courant arrivé en a se bifurque, une portion continue à passer par abc, et l'autre suit le fil adc; puis les deux courants partiels se réunissent en c, pour reconstituer un courant unique dans tout le reste du circuit. L'addition du fil adc n'agit en aucune façon sur la force électromotrice du système,

mais elle diminue évidemment la résistance du circuit entre les points *a*, *c*; par conséquent, elle détermine une augmentation d'intensité dans le courant total.

a et *c* sont appelés les *points de dérivation*.

abc est l'*intervalle de dérivation*, c'est-à-dire la portion du circuit primitif comprise entre les *points de dérivation*.

adc est le *fil de dérivation*

Le *courant primitif* est celui qui circulait à travers le circuit primitif *pabcn*V*p*, avant l'établissement du fil de dérivation.

Le *courant principal* est le courant qui traverse le circuit tout entier, après l'établissement du fil de dérivation.

Le *courant partiel* est le courant qui marche dans le fil *abc*, entre le point *a* et le point *b*, après l'établissement du fil de dérivation.

Le *courant dérivé* est le courant qui parcourt le *fil de dérivation adc*.

Le problème des courants dérivés consiste dans la détermination des rapports qui existent entre ces quatre courants. Soient :

E, la force électromotrice totale de l'appareil ;

R, la résistance de l'électromoteur V, augmentée de celle du fil *pa* et de celle du fil *nc* ;

r, la résistance de l'intervalle de dérivation *abc* ;

r', la résistance du fil de dérivation *adc*.

Il s'agit de déterminer :

I, l'intensité du courant *primitif* ;

I', l'intensité du courant *principal* ;

i, l'intensité du courant *partiel ;*

i', l'intensité du courant *dérivé*.

Courant primitif. — La résistance du circuit, avant l'établissement du fil de dérivation, était $R+r$; l'intensité du *courant primitif* était donc

$$I = \frac{E}{R+r}.$$

Courant principal. — Après l'établissement du fil de dérivation, la communication des points a et c existe à travers deux fils abc, adc, dont les résistances sont r et r'. Nous avons vu (page 42) que la résistance totale de ces deux fils est $\frac{rr'}{r+r'}$. Ces deux fils peuvent donc être remplacés par un seul fil dont la résistance serait

$$r'' = \frac{rr'}{r+r'}.$$

Par conséquent, après l'établissement du fil de dérivation, la résistance totale du circuit est

$$R + r'' = R + \frac{rr'}{r+r'} = \frac{R(r+r') + rr'}{r+r'}.$$

Et, comme la force électromotrice est restée la même, l'intensité du *courant principal* devient

$$I' = \frac{E}{R+r''} = \frac{E(r+r')}{R(r+r') + rr'}.$$

Mais le *courant principal* doit avoir la même intensité dans tous les points de son parcours. Puisque nous avons pu remplacer les deux fils abc, adc, par un fil unique dont

la résistance est r'', il en résulte que la différence des tensions aux points a et c, ou la force électromotrice e qui fait circuler le courant dans ce fil unique de résistance r'', satisfait à la relation suivante :

$$e : E :: r'' : R + r'';$$

d'où

$$e = \frac{Er''}{R + r''}.$$

Remplaçant r'' et $(R + r'')$ par leurs valeurs, cette dernière équation donne

$$e = \frac{Err'}{R(r + r') + rr'}.$$

Courants partiel et dérivé.—Nous savons que la différence des tensions des points a et c est égale à e. Cette différence de tension étant commune aux extrémités confondues des fils *abc* et *adc*, la force électromotrice est la même dans ces deux fils et égale à e; par conséquent, l'intensité du *courant partiel* est

$$i = \frac{e}{r},$$

ou bien

$$i = \frac{Er'}{R(r + r') + rr'};$$

et l'intensité du *courant dérivé* est

$$i' = \frac{e}{r'},$$

ou bien

$$i' = \frac{Er}{R(r + r') + rr'}.$$

En faisant la somme des intensités du *courant partiel* et du *courant dérivé*, nous trouvons

$$i+i' = \frac{Er'}{R(r+r')+rr'} + \frac{Er}{R(r+r')+rr'} = \frac{E(r+r')}{R(r+r')+rr'};$$

d'où, enfin,

$$i + i' = I.$$

Lorsqu'une dérivation est établie sur un circuit quelconque, la somme des intensités du *courant partiel* et du *courant dérivé* est donc égale à l'intensité du *courant principal*.

Puisque, entre les points *a* et *c*, la section transversale du circuit est égale à la somme des sections transversales du fil *abc* et du fil *adc*, cette proposition est un corollaire nécessaire du principe de l'égalité de l'intensité d'un courant dans tous les points de son parcours. L'expérience d'ailleurs démontre l'exactitude de cette conséquence de la théorie de Ohm.

Les intensités du courant *primitif*, et des trois courants qui coexistent dans le circuit après l'établissement du fil de dérivation, sont représentées par les quatre équations suivantes :

(1) **Courant primitif**..... $I = \frac{E}{R+r}$.

(2) **Courant principal**..... $I' = \frac{E}{R(r+r')+rr'}(r+r')$.

(3) **Courant partiel**..... $i = \frac{E}{R(r+r')+rr'} \times r'$.

(4) **Courant dérivé**..... $i' = \frac{E}{R(r+r')+rr'} \times r$.

De l'équation (1) et de l'équation (2) nous tirons

$$\frac{I'}{I} = \frac{(R + r)(r + r')}{R(r + r') + rr'} = \frac{R(r + r') + rr' + r^2}{R(r + r') + rr'};$$

d'où

$$\frac{I'}{I} = 1 + \frac{r^2}{R(r + r') + rr'}.$$

Par conséquent, le courant *principal* l'emporte toujours sur le courant *primitif*. Ce résultat pouvait être prévu, puisque l'établissement d'un fil de dérivation, en diminuant la résistance totale du circuit, doit avoir pour effet constant d'augmenter l'intensité du courant.

De l'équation (2) et de l'équation (3) nous tirons

$$\frac{I'}{i} = \frac{r + r'}{r'} = 1 + \frac{r}{r'}.$$

Ainsi : — 1° La résistance r' du fil de dérivation *adc* restant constante, le rapport de l'intensité du courant *principal* à l'intensité du courant *partiel augmente* en même temps que la résistance r de l'intervalle de dérivation *abc*.

2° La résistance r de l'intervalle de dérivation *abc* restant constante, le rapport de l'intensité du courant *principal* à l'intensité du courant *partiel diminue* à mesure que la résistance r' du fil de dérivation *adc augmente*.

Ces deux conséquences peuvent être énoncées de la manière suivante : — Pour une résistance r' constante du fil de dérivation *adc*, le courant *partiel* reste une fraction

du courant *principal* d'autant plus *grande*, que la résistance r de l'intervalle de dérivation *abc* est elle-même plus *faible*. — Pour une résistance r constante de l'intervalle de dérivation *abc*, le courant *partiel* reste une fraction du courant *principal* d'autant plus *grande*, que la résistance r' du fil de dérivation *adc* est elle-même plus *considérable*.

De l'équation (4) et de l'équation (2) nous tirons

$$\frac{I'}{i'} = \frac{r + r'}{r} = 1 + \frac{r'}{r}.$$

Ainsi : — 1° La résistance r' du fil de dérivation *adc* restant constante, le rapport de l'intensité du courant *principal* à l'intensité du courant *dérivé augmente* à mesure que la résistance r de l'intervalle de dérivation *abc diminue*.

2° La résistance r de l'intervalle de dérivation *abc* restant constante, le rapport de l'intensité du courant *principal* à l'intensité du courant *dérivé augmente* en même temps que la résistance r' du fil de dérivation *adc*.

Ces deux conséquences peuvent être énoncées de la manière suivante : — Pour une résistance r' constante du fil de dérivation *adc*, le courant *dérivé* est une fraction du courant *principal* d'autant plus *grande*, que la résistance r de l'intervalle de dérivation *abc* est elle-même plus *considérable*. — Pour une résistance r constante de l'intervalle de dérivation *abc*, le courant *dérivé* est une fraction du courant *principal* d'autant plus *grande*, que la résistance r' du fil de dérivation *adc* est elle-même plus *faible*.

Enfin de l'équation (3) et de l'équation (4) nous tirons

$$\frac{i'}{i} = \frac{r}{r'}.$$

Les intensités du courant *partiel* et du courant *dérivé* sont donc *en raison inverse* des résistances de leurs circuits respectifs (1). Ce qui nous conduit aux deux conséquences suivantes:

1° La résistance r' du fil de dérivation *adc* restant constante, le rapport de l'intensité i' du courant *dérivé* à l'in-

(1) Cette dernière relation fournit un moyen très simple et très rapide de déterminer les valeurs des intensités i, i', des courants *partiel* et *dérivé*. En effet :

D'une part, la somme de ces deux intensités i, i' est égale à l'intensité I' du courant *principal*, d'où :

$$i + i' = \mathrm{I}' = \frac{\mathrm{E}\,(r + r')}{\mathrm{R}\,(r + r') + rr'}.$$

D'autre part, les intensités i, i' et les résistances r, r' des courants *partiel* et *dérivé* doivent satisfaire à la relation :

$$\frac{i'}{i} = \frac{r}{r'}.$$

Enfin ces deux équations donnent :

$$i = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}\,(r + r') + rr'}\,r';$$

$$i' = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}\,(r + r') + rr'}\,r.$$

Ces deux dernières équations sont identiques avec les équations (3) et (4) que, par une autre voie, nous avions déjà trouvées pour représenter les valeurs des intensités i, i' des courants *partiel* et *dérivé*.

tensité i du courant *partiel* varie *proportionnellement* à la résistance r de l'intervalle de dérivation *abc*.

2° La résistance r de l'intervalle de dérivation *abc* restant constante, le rapport de l'intensité i' du courant *dérivé* à l'intensité i du courant *partiel* varie *en raison inverse* de la résistance r' du fil de dérivation *adc*.

ARTICLE IV.

ASSOCIATION DES COUPLES.

Les éléments électromoteurs peuvent être associés selon trois modes différents. — On peut les disposer les uns à la suite des autres, de manière que deux couples successifs soient réunis par leurs pôles de noms contraires : c'est l'association *en série*, ou *en pile*, ou *en tension*. — On peut aussi les disposer à côté les uns des autres, de manière que les pôles de même nom communiquent tous ensemble : c'est l'association *en batterie*, ou *en surface*, ou *en quantité*. — On peut encore les disposer de façon que les courants marchent en sens inverses dans le conducteur interpolaire : c'est l'association *en opposition*.

§ Ier. — Association en série.

Soient V, V′, V″, V‴ (Fig. 305), un certain nombre de couples associés en série, il s'agit de déterminer l'intensité du courant qui traverse le fil interpolaire.

1° **Couples égaux**.—Dans le cas où les couples sont égaux, nous avons vu (page 68) que l'intensité du courant est

$$I = \frac{nE}{nR + r}.$$

Dans cette formule, n représente le nombre des couples; E, la force électromotrice de chaque couple en

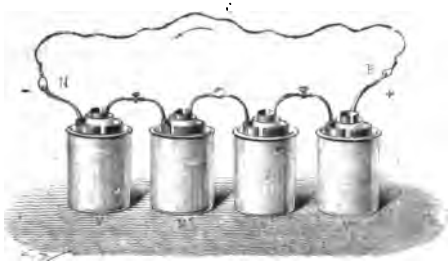


Fig. 305.

particulier; R, la résistance de chaque couple, et r, la résistance du conducteur interpolaire.

2° **Couples inégaux**.—Dans le cas où la force électromotrice et la résistance varient d'un couple à l'autre, des considérations bien simples peuvent faire connaître l'expression générale de l'intensité du courant. En effet, soient :

Pour le couple V..... { e, la force électromotrice,
r, la résistance du couple.

Pour le couple V'..... { e', la force électromotrice,
r', la résistance du couple.

Pour le couple V''..... { e'', la force électromotrice,
r'', la résistance du couple.

Pour le couple V'''..... { e''', la force électromotrice.
r''', la résistance du couple.

Évidemment ces résistances partielles s'ajoutent, et la résistance totale R de la pile est égale à leur somme, d'où

$$R = r + r' + r'' + r'''.$$

Soit, en outre, d, la résistance du conducteur interpolaire C.

Le courant fourni par chacun des couples de la série ne peut circuler qu'à la condition de surmonter la somme de ces résistances partielles; les intensités des quatre courants partiels seront donc :

Pour le couple V..... $i = \dfrac{e}{r + r' + r'' + r''' + d}$.

Pour le couple V'..... $i' = \dfrac{e'}{r + r' + r'' + r''' + d}$.

Pour le couple V''..... $i'' = \dfrac{e''}{r + r' + r'' + r''' + d}$.

Pour le couple V'''... $i''' = \dfrac{e'''}{r + r' + r'' + r''' + d}$.

Ces courants, marchant tous dans le même sens, se superposent et s'ajoutent; l'intensité I du courant total sera donc nécessairement égale à la somme des intensités des courants partiels; d'où

$$I = i + i' + i'' + i''' = \frac{e + e' + e'' + e'''}{r + r' + r'' + r''' + d}.$$

Faisant $E = e + e' + e'' + e'''$, l'équation précédente devient

$$I = \frac{E}{R + d}.$$

Par conséquent, lorsque des couples, *égaux* ou *inégaux*,

sont associés en *pile* ou en *série*, l'intensité du courant total est égale à la somme des forces électromotrices partielles des couples divisée par la somme de leurs résistances partielles, plus la résistance du conducteur interpolaire.

Il en résulte encore que la force électromotrice E d'une pile composée d'un nombre quelconque de n couples, *égaux* ou *inégaux*, est égale à la somme des forces électromotrices partielles de tous ces éléments; d'où

$$E = e' + e'' + e''' + \ldots + e^{n}.$$

§ II. — Association en opposition.

Soient V, V′ (Fig. 306), deux couples quelconques. A l'aide du fil métallique C réunissons les deux pôles posi-

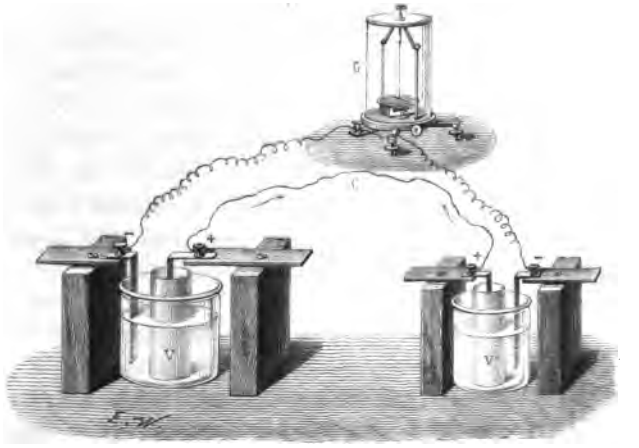


Fig. 306.

tifs, et mettons de même les deux pôles négatifs en communication au moyen du galvanomètre G. Évidemment

ces deux couples tendent à établir, dans le circuit, deux courants de sens inverses. Soient :

e, la force électromotrice du couple V;

e', la force électromotrice du couple V';

R, la résistance totale du circuit, égale à la somme des résistances partielles.

L'intensité i du courant du couple V serait

$$i = \frac{e}{R}.$$

L'intensité i' du courant du couple V' serait

$$i' = \frac{e'}{R}.$$

Il s'agit de déterminer la valeur I de l'intensité du courant *résultant* de ces deux courants de sens inverses.

1° Supposons que ces deux courants opposés traversent à la fois le circuit. — L'effet produit par ces deux forces de sens contraires sur l'aiguille du galvanomètre est égal à la différence des déviations correspondantes aux actions individuelles et séparées des deux couples V, V' dans ce même circuit. L'intensité I de la *résultante* de ces deux courants peut donc être représentée par la différence de leurs intensités; d'où

$$I = i - i' = \frac{e}{R} - \frac{e'}{R}.$$

L'effet final ne peut évidemment être nul qu'à la condition que les deux courants partiels soient égaux. Dans tout autre cas, les effets extérieurs se manifestent dans le sens de celui des deux courants dont l'intensité est la plus grande.

Les deux fractions qui représentent les intensités des deux courants partiels ayant le même dénominateur, l'expression de l'intensité de l'effet final peut se mettre sous la forme suivante :

$$I = \frac{e - e'}{R}.$$

D'où il suit que l'effet *résultant* de deux courants *opposés* dans un même circuit est égal à celui que produirait, dans le même circuit, un courant dont la force électromotrice serait la différence des deux forces électromotrices des courants opposés. Il est évident d'ailleurs que cet effet final ne peut être *nul* que lorsque les forces électromotrices e, e' des deux courants opposés sont *égales*.

2° On peut admettre, et cette manière de voir est pour nous l'expression de la vérité, que le circuit n'est pas traversé par deux courants de sens inverses, mais par un seul courant dont le sens et l'intensité représentent l'action finale des deux électromoteurs opposés.

On considère alors que, dans le même circuit, l'électricité étant sollicitée par deux forces électromotrices de sens contraires e, e', tout doit se passer nécessairement comme si ces deux forces étaient remplacées par une force *unique* égale à leur différence, $e—e'$, et agissant dans le sens de la plus grande. L'effort des deux électromoteurs V, V′, se résume donc en l'établissement d'un courant *unique* de sens déterminé, et dont l'intensité I est

$$I = \frac{e - e'}{R}.$$

Il est remarquable de voir que, quelle que soit la

théorie adoptée, nous arrivons toujours à représenter l'effet final de deux couples *en opposition* par une même expression générale, et à cette conclusion, que cet effet ne peut être *nul* qu'autant que les deux forces électromotrices sont *égales*.

Ce que nous avons dit de deux couples *en opposition* s'applique également au cas où l'on opposerait une pile à une pile, ou une pile à un couple. L'*intensité* de l'*effet final*, ou mieux du *courant unique résultant* est, dans tous les cas, égale au quotient de la différence des forces électromotrices des deux appareils *en opposition* par la résistance totale du circuit, c'est-à-dire par la somme des résistances des deux électromoteurs eux-mêmes et des fils qui servent à mettre leurs pôles en communication.

Le cas de deux couples ou de deux électromoteurs quelconques *en opposition* a été, pour la première fois, analysé avec beaucoup de soin par M. J. Regnauld (1). Après avoir exposé, d'une manière très lucide, les principes sur lesquels reposent les formules représentatives de l'intensité du courant résultant, il a montré que l'opposition des électromoteurs fournit un moyen très simple de mesurer leurs forces électromotrices. Nous exposerons plus loin, dans le cinquième article de ce chapitre, cette méthode très exacte, introduite dans la science par M. J. Regnauld.

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1854, t. XXXVIII, p. 38.

§ III. — Association en batterie.

Étant donné un certain nombre de couples voltaïques, au lieu de les disposer tous en une *seule série*, on peut les partager en *séries parallèles* contenant chacune un nombre égal de couples, et faire communiquer toutes ces séries par leurs pôles de même nom. On forme alors une *batterie voltaïque*. Quelle que soit la disposition adoptée, du moment que le nombre des couples associés est invariable, c'est toujours la même étendue superficielle de *métal positif* qui reste exposée à l'action du liquide actif. Cependant, suivant la nature des effets à produire, ou plutôt suivant la valeur de la résistance de l'arc interpolaire, l'intensité du courant fourni par un nombre déterminé de couples dépend de la disposition qu'on leur donne.

A. Les couples associés sont égaux. — Du moment que les couples sont égaux, la nature et les dimensions des éléments constitutifs métalliques et liquides, la force électromotrice et la résistance, doivent être les mêmes pour chacun d'eux. Soient :

E, la force électromotrice de chaque couple ;

R, la résistance de chaque couple ;

r, la résistance du circuit interpolaire ;

m, le nombre des couples.

Lorsque tous les couples sont rangés en une *seule* série, l'intensité I du courant est

$$(1) \qquad I = \frac{mE}{mR + r}.$$

Dans ce cas, la force électromotrice de l'appareil et les tensions polaires ont leur *maximum* de valeur mE. On dit alors que les couples sont disposés en *tension*.

Avec ces m couples formons n séries parallèles; *chacune* d'elles se composera nécessairement de $\frac{m}{n}$ couples. — Les tensions polaires de ces séries sont les mêmes. Or, la communication établie entre des corps en équilibre de

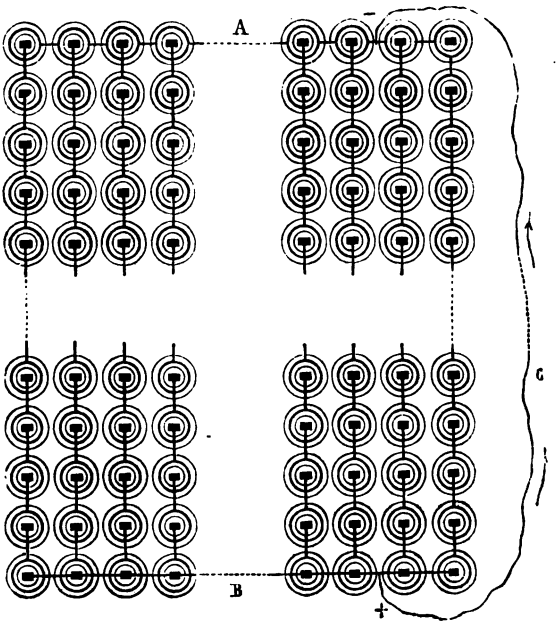


Fig. 307.

tension ne peut déterminer aucun mouvement électrique. Lors donc que nous mettons (Fig. 307) toutes ces

séries en communication par leurs pôles de même nom, la distribution de l'électricité reste la même, et les extrémités polaires A, B, de la batterie, présentent la même différence de tension que les deux pôles de l'une quelconque de ces n séries prise à part.

Quand le circuit est fermé à l'aide de l'arc ACB, la force électromotrice de la *batterie* est la même que celle d'une des séries prise à part; et, puisque chaque série se compose de $\frac{m}{n}$ couples, la force électromotrice de la batterie est

$$\frac{m}{n}\mathrm{E}.$$

Chaque série est composée de $\frac{m}{n}$ couples; par conséquent, la résistance d'une série quelconque, considérée à part, est $\frac{m}{n}\mathrm{R}$. Mais les surfaces polaires de la *batterie* sont reliées par un nombre n de séries égales et parallèles, qui toutes livrent passage au courant. La conductibilité de la *batterie* est donc *n fois* celle de l'une quelconque des séries dont elle est composée, et la résistance de cette batterie est représentée par l'expression

$$\frac{m\mathrm{R}}{n^2}.$$

Ces valeurs de la force électromotrice et de la résistance conduisent à l'expression suivante de l'intensité I' du courant de la batterie :

$$\mathrm{I}' = \frac{\frac{m}{n}\mathrm{E}}{\frac{m\mathrm{R}}{n^2} + r}. \qquad (2)$$

De la comparaison de cette dernière formule et de la formule (1), il résulte que la force électromotrice et les tensions polaires sont plus faibles dans la *batterie* composée de n séries de $\frac{m}{n}$ couples chacune, que dans la pile composée d'une *seule* série de m couples. Mais, d'autre part, la résistance de la *batterie* est plus faible que celle de la pile composée d'une série *unique* de ces m couples. Or, comme l'intensité du courant d'un appareil quelconque n'est jamais que le rapport de la force électromotrice à la résistance du circuit entier, le rapprochement des deux formules (1) et (2) montre que, pour certaines valeurs de la résistance r du circuit interpolaire et du nombre n des séries parallèles de la *batterie*, l'intensité I' du courant de cette *batterie* peut être plus *grande* que l'intensité I du courant de la pile contenant le même nombre m de couples associés en une série *unique*.

Si, maintenant, nous considérons la *batterie* parallèlement à ses faces polaires A, B, nous la trouvons composée de $\frac{m}{n}$ *rangées perpendiculaires* à la ligne des pôles contenant n couples chacune. Or, tous les couples d'une même *rangée* sont évidemment en équilibre de tension ; par conséquent, chacune de ces rangées représente, en réalité, un *grand couple* dont les surfaces métalliques auraient une étendue égale à n *fois* celle des éléments métalliques de chacun des couples employés. La *batterie* elle-même peut être considérée comme formée par la réunion en *série* de $\frac{m}{n}$ de ces *grands couples*. Mais nous

avons vu (t. Ier, p. 416) que la *quantité* d'électricité mise en mouvement dans un temps donné dépend de l'*étendue* des surfaces métalliques des couples. Il en résulte que la batterie voltaïque est un électromoteur, qui fournit une quantité considérable d'électricité circulant sous une faible tension. Quand des éléments voltaïques sont associés en *batterie*, on dit que ces couples sont disposés en *quantité*.

Nous avons trouvé, pour expression de l'intensité du courant de la batterie :

$$I' = \frac{\frac{m}{n}E}{\frac{mR}{n^2} + r};$$

d'où

$$I' = \frac{mnE}{mR + n^2 r}. \qquad (3)$$

Cette dernière formule nous permet de déterminer, dans chaque cas particulier, les conditions à remplir et le mode d'association à adopter, pour que le courant d'un électromoteur composé d'un nombre déterminé m de couples égaux atteigne le *maximum* d'intensité.

En effet :

Dans l'équation (3), la force électromotrice E et la résistance R de chaque couple, la résistance r du circuit interpolaire et le nombre m de couples employés, ont des *valeurs constantes;* la *seule quantité variable* est le nombre n des séries parallèles formées avec ces m couples. Par

conséquent, l'intensité I' du courant de la *batterie* atteint son *maximum*, quand nous avons

$$mR = n^2 r;$$

d'où

$$r = \frac{mR}{n^2}. \tag{4}$$

De cette dernière relation découle cette proposition fondamentale :

Pour que le courant fourni par m couples égaux ait son *maximum* d'intensité, le nombre n des séries parallèles formées avec ces couples doit être tel, que la résistance totale $\frac{mR}{n^2}$ de l'électromoteur soit égale à la résistance r du circuit interpolaire. Faisons sur la valeur de r deux hypothèses extrêmes.

1° Supposons que la résistance de ce circuit interpolaire soit égale à la somme des résistances des m couples associés. Dans cas, $r = mR$; en remplaçant r par sa valeur dans l'équation (4), nous trouvons $n = 1$. — Ce résultat indique que, dans cette hypothèse, la meilleure disposition à adopter est d'associer les m couples en *tension*, c'est-à-dire d'en composer une série *unique*.

Il est facile de voir, d'ailleurs, que si nous remplaçons, dans l'équation (2), r et n par leurs valeurs mR et 1, l'intensité du courant devient

$$I' = \frac{mE}{mR + mR}.$$

Cette dernière formule est évidemment l'expression de l'intensité du courant d'une pile composée de m cou-

ples égaux, lorsque la résistance de chaque couple est R et qu'elle est fermée par un conducteur interpolaire, dont la résistance est égale à la somme mR des résistances de tous les couples de cette série *unique*.

2° Prenons un conducteur interpolaire dont la résistance soit $r = \frac{R}{m}$; la substitution dans l'équation (4) donne $n = m$. — Dans ce cas donc, pour obtenir le *maximum* d'intensité, il faut former, avec les m couples, m séries d'*un seul* couple chacune, ou disposer tous les couple en *quantité ;* en d'autres termes, il faut ranger tous les couples à côté les uns des autres, et les faire tous communiquer par leurs pôles de même nom.

Comme vérification de ce résultat, remplaçons r et n par leurs valeurs dans l'équation (2). L'intensité du courant devient

$$I' = \frac{m^2 E}{mR + mR} = \frac{E}{\frac{R}{m} + \frac{R}{m}}.$$

Cette dernière formule est évidemment l'expression de l'intensité du courant d'une *batterie* de m couples disposés en une *seule* rangée et communiquant tous par leurs pôles de même nom, lorsqu'elle est fermée par un conducteur interpolaire dont la résistance est égale à celle de la *batterie*, ou à la résistance R d'un couple unique divisée par le nombre m des couples associés en *quantité*.

Quelle que soit la valeur de la résistance r du conducteur interpolaire, l'équation (4) nous donne le moyen de déterminer le nombre n des séries parallèles qu'il faut

former avec les m couples, pour que le courant ait son *maximum* d'intensité. Il est facile de voir que :

Ce nombre n de séries parallèles est *inversement* proportionnel à la *racine carrée* de la résistance r du conducteur interpolaire.

Et que, par conséquent, le nombre $\frac{m}{n}$ de couples, dont se compose chaque série, est *directement* proportionnel à la *racine carrée* de cette résistance r du conducteur interpolaire.

Ainsi donc, pour obtenir le *maximum* d'effet avec un nombre de couples déterminé, on doit, suivant les cas, tantôt en former une série *unique*, tantôt les disposer en séries *multiples* et *parallèles* communiquant toutes par leurs pôles de même nom ; avec la première disposition on a un appareil de *tension*, avec la seconde on a une *batterie voltaïque* ou appareil de *quantité*.

Mais, dans le choix à faire entre ces deux modes d'association, il faut, avant tout, se préoccuper de la résistance du conducteur interpolaire. Le *maximum* d'intensité correspond toujours à la disposition, pour laquelle la résistance totale de l'électromoteur, *pile* ou *batterie*, est égale à la résistance de cet arc conjonctif.

La question que nous venons de traiter, de la meilleure disposition à adopter dans l'association d'un nombre déterminé de *couples égaux*, se réduit évidemment à celle-ci :

La surface de l'élément zinc qui entre dans la construction d'une pile *conservant la même étendue*, vaut-il mieux découper le métal en *plaques peu nombreuses* et *de grande surface*, ou en *plaques nombreuses* et de *faible surface?*

Dans le premier cas, la pile se compose d'un petit nombre de couples à grandes dimensions ; sa résistance et sa force électromotrice sont faibles. La pile est alors un appareil de *quantité*, et jouit de toutes les propriétés des *batteries voltaïques*.

Dans le second cas, la pile se compose d'un grand nombre de couples à faibles dimensions ; sa résistance et sa force électromotrice sont considérables. La pile est alors un véritable appareil de *tension*.

Supposons que nous ayons à notre disposition une plaque de zinc dont la surface *invariable* soit S.

Nous pouvons en former un seul couple. Appelant k la résistance spécifique du liquide actif, et D la distance des deux lames métalliques du couple, la résistance de ce grand couple sera

$$k\,\frac{D}{S}.$$

Nous pouvons découper le zinc en n plaques égales, dont chacune aura $\frac{S}{n}$ de surface. Dans ce cas, la force électromotrice de chaque couple sera toujours E, mais sa résistance deviendra

$$k\,\frac{\frac{D}{S}}{n} = \frac{kD}{S}\,n.$$

Par conséquent, la résistance totale R de la pile composée de ces n couples associés en une *série unique* sera

$$R = \frac{kD}{S}\,n^2.$$

Fermons cette pile avec un conducteur interpolaire de résistance r. Appelant I l'intensité du courant de la pile, nous aurons

$$I = \frac{nE}{\frac{kD}{S}n^2 + r}.$$

Dans cette équation, la résistance spécifique k du liquide actif, la distance D des lames métalliques de chaque couple, la force électromotrice E de chaque couple et la surface *totale* S du zinc emploÿé ont des *valeurs constantes*. La *seule quantité variable* est le nombre n des couples associés. Par conséquent, l'intensité I du courant atteint son *maximum*, quand nous avons

$$\frac{kD}{S}n^2 = r; \tag{5}$$

c'est-à-dire, quand la résistance *totale* R de la pile est égale à la résistance r du conducteur interpolaire.

Pour une résistance donnée r du circuit interpolaire, l'équation (5) fournit la valeur de n; elle permet donc de déterminer, dans chaque cas particulier, en combien de plaques il faut partager la grande surface de zinc S, ou de combien de couples il faut composer la pile pour obtenir le *maximum* d'effet. Cette équation montre encore que ce nombre n de couples varie *proportionnellement* à la *racine carrée* de la résistance r du circuit interpolaire. Par conséquent, la surface $\frac{S}{n}$ de la plaque de zinc de chaque couple varie *en raison inverse* de la *racine carrée* de cette résistance r du conducteur interpolaire.

De quelque manière que nous envisagions cette question, nous arrivons donc toujours à des conclusions identiques. — Appliquons les résultats de cette discussion à deux cas très différents par la nature des effets à obtenir.

Quand il s'agit de produire des phénomènes d'incandescence dans un conducteur métallique, la résistance de l'arc interpolaire est toujours très faible en comparaison de celle des liquides d'un élément voltaïque. Dès lors, il y a avantage à associer tous les couples en *quantité*, à les faire *tous* communiquer par leurs pôles de même nom. La force électromotrice de l'appareil est faible ; elle reste égale à celle d'un couple *unique*. Mais, en raison de la résistance *très petite* du circuit, les conditions sont bonnes pour que le courant ait une intensité *très grande*. On obtient ainsi *une quantité très considérable* d'électricité circulant sous une *faible tension*. Dans ce cas, les couples en hélice (t. I, p. 304), qui sont des éléments voltaïques à très grandes surfaces, produisent de très beaux effets.

Il n'en est plus de même, quand la résistance du circuit interpolaire est très considérable. Supposons, par exemple, qu'on veuille obtenir des phénomènes lumineux. — Pour que l'arc voltaïque ait de l'éclat, il doit passer d'une surface polaire à l'autre une très grande quantité d'électricité ; il y a donc indication formelle de disposer les couples en séries parallèles formant *batterie*. — Mais, d'autre part, le circuit interpolaire est très résistant, et pour que le courant ait de l'intensité, la force électromotrice de l'appareil doit être considérable. — Pour obtenir de beaux effets lumineux, il est donc nécessaire d'associer *en tension* un grand nombre de couples à grandes

surfaces, ou de réunir en *batterie* plusieurs séries parallèles composées *chacune* d'un grand nombre de couples à petites surfaces. — Pour un nombre donné de couples à petites surfaces, la formule (4) permet toujours de déterminer en combien de séries parallèles on doit les partager, pour obtenir le *maximum* d'effet.

Jusqu'ici nous n'avons parlé que des combinaisons voltaïques ou hydro-électriques. Quand il s'agit des appareils thermo-électriques, la force électromotrice des éléments est tellement faible, que, quelles que soient la nature et la résistance du conducteur interpolaire, il y a évidemment toujours avantage à associer les couples en *tension*. D'ailleurs, même avec un nombre très considérable de couples associés en série, les courants thermo-électriques ne produisent jamais que de très faibles effets chimiques.

B. — **Les couples associés sont inégaux en force.** — Lorsque les couples associés en batterie ne sont pas de même force, l'analyse des phénomènes devient beaucoup plus difficile. Sans aborder ici le problème dans toute sa généralité, il nous semble utile cependant de nous arrêter un instant sur le cas de l'association en batterie de deux couples inégaux.

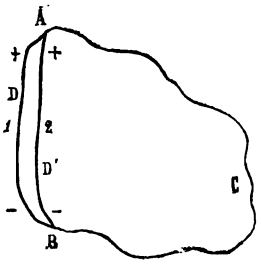


Fig. 308.

Soient 1 et 2 (Fig. 308) deux couples inégaux réunis en A par leurs pôles positifs, et en B par leurs pôles négatifs; soit en outre ACB un conducteur qui complète le circuit. Soient enfin :

E', la force électromotrice du couple 1 ;

E'', la force électromotrice du couple 2 ;

r', la résistance de la portion ADB du circuit du couple 1 ;

r'', la résistance de la portion AD'B du circuit du couple 2 ;

r, la résistance de l'arc conjonctif ACB.

Considérons d'abord le couple 1. — Si ce couple *agissait seul*, son courant se bifurquerait au point A ; une portion suivrait le trajet ACB, et l'autre traverserait le couple 2 dans la direction AD'B. La résistance de cette portion bifurquée du circuit est $\frac{rr''}{r+r''}$; la résistance totale du circuit du courant du couple 1 *agissant seul* serait donc

$$r' + \frac{rr''}{r+r''} = \frac{r(r'+r'') + r'r''}{r+r''}.$$

Dès lors, l'intensité du courant fourni par le couple 1 serait

$$\frac{E'(r+r'')}{r(r'+r'')+r'r''} = \frac{E'r}{r(r'+r'')+r'r''} + \frac{E'r''}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

Les formules (2), (3) et (4) de la page 92, relatives aux courants dérivés, montrent que le *premier* terme du second membre de cette équation représente l'intensité du courant du couple 1 dans le circuit partiel AD'B, et que le *second* terme du second membre de la même équation représente l'intensité du courant du couple 1 dans l'arc conjonctif ACB. Mais, d'une part, la force électromotrice dans une portion quelconque d'un circuit est égale

au produit de l'intensité du courant dans cette portion du circuit par sa résistance propre ; d'autre part, nous savons que les deux portions du courant du couple 1, qui passent l'un dans l'arc conjonctif ACB, et l'autre dans le circuit partiel AD'B, ont la même force électromotrice. Si donc nous désignons par e' la différence de tension créée par le courant du couple 1 entre les points A et B, ou la force électromotrice de ce courant dans chacun des circuits partiels ACB, AD'B, nous aurons

$$e' = \frac{E' r r''}{r\,(r' + r'') + r' r''}.$$

Si, de plus, nous représentons par e_1', la force électromotrice du même courant dans la portion BDA de son circuit, nous obtiendrons la valeur de cette force électromotrice partielle en multipliant l'intensité du courant par la résistance r' de BDA, et nous aurons

$$e_1' = \frac{E' r' (r + r'')}{r\,(r' + r'') + r' r''}.$$

Il est facile de voir d'ailleurs, comme vérification de l'exactitude de ce calcul, que la somme de ces deux forces électromotrices partielles e' et e_1', est égale à E', force électromotrice totale de ce couple 1.

Considérons maintenant le couple 2. — Si ce couple *agissait seul*, son courant se bifurquerait aussi au point A ; une portion suivrait le trajet ACB, et l'autre traverserait le couple 1 dans la direction ADB. La résistance totale du circuit du courant fourni par le couple 2 *agissant seul*

serait donc $\frac{r(r'+r'')+r'r''}{r+r'}$, et son intensité totale serait

$$\frac{E''(r+r')}{r(r'+r'')+r'r''} = \frac{E''r}{r(r'+r'')+r'r''} + \frac{E''r'}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

Le *premier* terme du second membre de cette équation représente l'intensité du courant du couple 2 dans le circuit partiel ADB; le *second* terme du second membre de cette équation représente l'intensité du courant du couple 2 dans l'arc conjonctif ACB. — Appelant e'' la force électromotrice de ce courant dans chacun des circuits partiels ACB, ADB, et e_1'' la force électromotrice de ce courant dans le circuit partiel AD'B, nous aurons :

$$e'' = \frac{E''rr'}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

$$e_1'' = \frac{E''r''(r+r')}{r(r'+r'')+r'r''},$$

Mais les deux couples 1 et 2 agissent à la fois. Dès lors ces *quatre* forces électromotrices entrent en lutte, et de leur combinaison résulte l'établissement de *trois* courants, un pour chacun des circuits partiels ACB, ADB, AD'B. Ce qui précède nous fournit le moyen de déterminer le sens et l'intensité de chacun de ces courants *résultants*.

Au point A, les deux forces électromotrices e', e'', agissent dans le même sens pour pousser le courant dans l'arc conjonctif ACB. L'intensité I du courant dans cet arc ACB sera donc égale à la somme, $e'+e''$, de ces

forces électromotrices de même sens, divisée par sa résistance propre r. D'où

$$(1) \qquad I = \frac{E'r'' + E''r'}{r(r' + r'') + r'r''}.$$

Au point A, la force électromotrice e'' pousse le courant du couple 2 dans la direction ADB ; mais elle entre en lutte avec la force électromotrice e_1' qui, de son côté, pousse le courant du couple 1 dans la direction inverse BDA. L'intensité I′ du courant *résultant* dans le circuit partiel ADB sera donc égale à la différence, $e_1' - e''$, de ces forces électromotrices opposées, divisée par sa résistance propre r'. D'où

$$(2) \qquad I' = \frac{E'(r + r'') - E''r}{r(r' + r'') + r'r''}.$$

Enfin, au même point A, la force électromotrice e' pousse le courant du couple 1 dans la direction AD′B; elle entre donc en lutte avec la force électromotrice e_1'' qui, de son côté, pousse le courant du couple 2 dans la direction inverse BD′A. L'intensité I″ du courant *résultant* dans le circuit partiel AD′B sera donc égale à la différence, $e' - e_1''$, de ces deux forces électromotrices opposées, divisée par sa résistance propre r''. D'où

$$(3) \qquad I'' = \frac{E'r - E''(r + r')}{r(r' + r'') + r'r''}.$$

L'examen de l'équation (1) montre que le courant partiel qui passe dans l'arc conjonctif ACB n'est jamais *nul*, et qu'il est toujours dirigé dans le *même sens*, c'est-à-dire

du pôle positif A au pôle négatif B de la batterie. Dans cette formule, en effet, tous les termes sont positifs ; par conséquent la valeur de l'intensité I de ce courant n'est jamais nulle, et ne peut pas changer de signe. D'ailleurs, les quantités E', E'', r', r'', restant les mêmes, il est facile de voir que l'intensité de ce courant partiel varie en sens inverse de la valeur de la résistance r de l'arc ACB.

Pour faciliter la discussion des formules (2) et (3), nous devons examiner à part les deux cas suivants :

1° La force électromotrice E' du couple 1 est plus grande que la force électromotrice E'' du couple 2. — Le numérateur du second membre de l'équation (2) est nécessairement positif. Cela indique que, dans ce cas, le courant *résultant* dans le circuit partiel BDA, tout entier fourni par le couple 1, est de même sens que la force électromotrice E' de ce couple.

Quant au courant *résultant* qui traverse le couple 2, la formule (3) montre que l'expression de son intensité I'' peut, suivant la valeur de r, être positive, négative ou nulle. — Quand I'' est positif, le courant *résultant* marche suivant AD'B, c'est-à-dire en sens inverse du courant qu'aurait produit le couple 2 ; il est exclusivement fourni par le couple 1. Dans ce cas, le sens de tous les courants partiels dépend du couple 1, qui est fermé à la fois par l'arc ACB et par le circuit partiel AD'B. — Quand I'' est négatif, ce courant *résultant* marche suivant BD'A, c'est-à-dire dans le sens de la force électromotrice du couple 2 ; il est exclusivement fourni par le couple 2, et s'écoule tout entier par l'arc ACB. Dans ce cas, les deux couples n'échangent rien entre eux, et fournissent tous deux au courant de

l'arc ACB qui les ferme. — Enfin quand I″ est nul, il ne passe pas de courant dans le circuit partiel AD′B. Mais le couple 1 continue à fournir, et fournit *seul*, un courant à l'arc ACB; l'action du couple 2 se borne à maintenir, en A et B, des tensions qui empêchent le courant du couple 1 de traverser le circuit partiel AD′B.

2° La force électromotrice E″ du couple 2 l'emporte sur la force électromotrice E′ du couple 1. — Dans cette hypothèse, la discussion des formules (2) et (3) fournirait des résultats identiques avec ceux que nous venons d'exposer; seulement, le couple 2 et son circuit partiel AD′B prendraient la place du couple 1 et de son circuit partiel ADB.

Arrêtons-nous un instant sur le cas où, E′ étant plus grand que E″, l'intensité I″ est *nulle*, et, par conséquent, il ne passe pas de courant dans le circuit partiel AD′B. Pour atteindre ce résultat, il suffit et il faut que la valeur de r, dont on peut toujours disposer, soit telle que

$$E'r = E''(r + r'),$$

d'où

$$r = \frac{E''r'}{E' - E''}.$$

Ce cas est donc toujours réalisable, puisque E′ étant plus grand que E″, la valeur de r tirée de cette équation est toujours positive.

L'expérience montre, en effet, que si, dans le circuit partiel AD′B du couple 2, on place un galvanomètre entre ce couple et le point A, on peut toujours donner à r une valeur telle que l'aiguille aimantée reste fixe sur le *zéro*

de la graduation ; évidemment alors aucun courant ne passe par AD'B.

Dans ce cas,

$$E'' = E'\frac{r}{r + r'}.$$

Puisque les résistances r et r' de l'arc conjonctif ACB et du couple 1 peuvent être expérimentalement déterminées, si l'on prend pour *unité* la force électromotrice E' du couple 1, cette équation fournit la valeur de la force électromotrice E'' du couple 2. M. Poggendorff (1) a fondé, sur cette propriété des circuits composés, un procédé de mesure des forces électromotrices.

Mais, puisque le courant du couple 1 ne passe plus par le circuit AD'B, son intensité I doit être égale à

$$I = \frac{E'}{r + r'}.$$

Et, en effet, en remplaçant dans la formule (1) E'' par sa valeur, $\frac{E'r}{r + r'}$, nous trouvons que l'intensité du courant qui s'écoule par l'arc ACB est

$$I = \frac{E'r'' + \frac{E'rr'}{r + r'}}{r(r' + r'') + r'r''};$$

d'où

$$I = \frac{E'r''(r+r') + E'rr'}{[r(r'+r'') + r'r''](r+r')} = \frac{E'[r(r'+r'') + r'r'']}{[r(r'+r'') + r'r''](r+r')} = \frac{E'}{r+r'}.$$

(1) *Ann. de Poggendorff*, t. LIV, p. 161.

De plus, dans l'arc conjonctif ACB, le courant doit avoir une force électromotrice partielle e', telle que

$$\frac{e'}{r} = \frac{E'}{r + r'},$$

d'où

$$e' = E' \frac{r}{r + r'}.$$

Et c'est, en effet, la valeur que prend l'expression générale $e' = \frac{E' rr''}{r(r'+r'')+r'r''}$ de la force électromotrice du courant partiel poussé par le couple 1 dans l'arc ACB, quand, après avoir divisé les deux termes du second membre par r'', on fait r'' égal à l'*infini*, pour indiquer qu'aucune fraction du courant du couple 1 ne peut passer par le circuit partiel AD'B.

Mais puisque, dans ce cas, la force électromotrice e', dans l'arc ACB, est égale à $E' \frac{r}{r+r'}$, il en résulte que e' est égale à E''. Cela nous mène à ce principe :

Dans le cas où deux couples inégaux, 1 et 2, sont associés pôle à pôle, et fermés par un arc commun ACB, si la force électromotrice partielle e', développée par le couple le plus fort 1 dans le circuit commun ACB, est égale à la force électromotrice totale E'' du couple le plus faible 2, le circuit partiel AD'B du couple le plus faible n'est traversé par aucun courant ; tout se passe en réalité comme si le couple 2 était supprimé, et si le couple 1 était *seul* fermé par l'arc interpolaire ACB.

Ce principe est évident de lui-même. En effet, puisque la force électromotrice partielle e' dans l'arc ACB est

égale à la force électromotrice totale E″ du couple 2, le couple 1 détermine, en A et en B, des tensions égales à celles que peut y développer et y maintenir le couple 2. Dès lors ces tensions se font équilibre, l'électricité fournie par le couple 1 circule *seule* librement dans le conducteur ACB; tandis que l'électricité fournie par le couple 2, arrêtée par une force égale et de sens contraire, ne peut pénétrer dans ce conducteur.

ARTICLE V.

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES.

La solution de toutes les questions relatives à l'intensité des courants électriques dépend de deux quantités : la résistance du circuit, et la force électromotrice de la pile. Nous avons vu comment on peut calculer la résistance de la portion interpolaire, liquide ou solide, du circuit; nous avons vu aussi comment il est possible, au moyen de deux observations, de déterminer expérimentalement la résistance de l'électromoteur. Déjà nous avons indiqué le principe sur lequel M. Poggendorff a basé son procédé de comparaison entre les forces électromotrices; pour terminer tout ce qui est relatif à l'exposition des lois générales des courants, il ne nous reste plus qu'à nous occuper des méthodes employées pour mesurer la force électromotrice d'un appareil quelconque.

§ Ier. — Forces électromotrices des appareils hydro-électriques.

Méthode de mensuration. — Des physiciens éminents, parmi lesquels nous citerons MM. Ohm (1), Fechner (2), Poggendorff (3), Joule (4), Wheatstone (5), Kohlrausch (6), etc., se sont occupés de la détermination des forces électromotrices; leurs recherches ont puissamment contribué au perfectionnement de la théorie générale de l'électricité dynamique. M. J. Regnauld (7) a repris cette question dans un travail remarquable autant par la nouveauté, la simplicité et l'exactitude de la méthode suivie, que par l'importance des résultats dont il a enrichi la science. Dans l'impossibilité où nous sommes de passer en revue les procédés d'investigation employés par ces divers observateurs, nous nous bornerons à exposer la *méthode d'opposition* proposée et mise en usage par M. J. Regnauld.

Considérons deux couples V et V′ très différents par leurs dimensions, tels que ceux de la figure 309. Les surfaces immergées des lames métalliques n'ont pas la

(1) *Théorie mathématique de la pile galvanique.* Berlin, 1827.

(2) *Résultats numériques d'observations de la pile galvanique.* Leipsick, 1831.

(3) *Ann. de Poggendorff*, t. LIV, p. 161.

(4) *Philosophical Magazine*, febr. 1844.

(5) *Philosophical Transactions*, IIe partie, 1843.

(6) *Ann. de Poggendorff*, t. LXXV, p. 220.

(7) *Recherches sur les forces électromotrices.* Thèse pour le doctorat ès sciences. Paris, 1853.

même étendue, et ne sont pas placées à la même distance ; par conséquent, les couches liquides interposées n'ont ni la même section ni la même épaisseur. Soient : e, la force électromotrice du couple V, et e', la force électromotrice du couple V'.

1° Si les couples sont de *même nature*, s'ils sont composés des mêmes métaux et des mêmes liquides au même degré de concentration, les tensions polaires sont les mêmes, la force électromotrice e' du petit couple V' est égale à la force électromotrice e du grand couple V. Mais les résistances des deux couples sont inégales ; et, comme le rapport de l'étendue des surfaces métalliques immergées à leur distance est plus considérable dans les grands couples que dans les petits, si l'on ferme successivement ces deux couples avec un même conducteur interpolaire, le courant fourni par V a plus d'*intensité* que le courant fourni par V'.

Mettons ces deux couples *en opposition* (Fig. 309), et plaçons un galvanomètre G dans le circuit. La résistance totale du système est égale à la somme des résistances opposées par le petit couple, par le grand couple, par le galvanomètre et par les fils de communication. Le courant du grand couple V et celui du petit couple V' ont donc la même résistance à surmonter pour circuler. Appelant I l'intensité du courant *résultant*, et R la résistance totale du circuit, nous avons

$$I = \frac{e - e'}{R}.$$

Mais, puisque la force électromotrice e est égale à la

force électromotrice e', l'expression précédente est nulle ; ces deux forces électromotrices égales et de sens contraires se neutralisent ; il ne doit pas y avoir d'effet produit sur le galvanomètre G. Cette prévision de la théorie est jus-

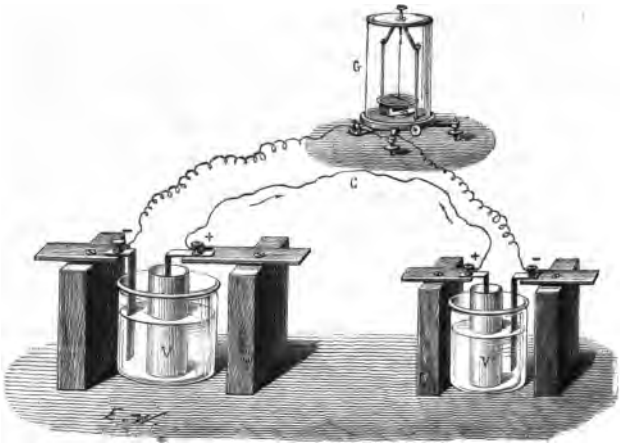


Fig. 309.

tifiée par l'expérience, car le galvanomètre, dans le cas d'opposition des deux couples de même *nature* et de surfaces inégales, ne traduit l'existence d'aucune action directrice, et l'aiguille aimantée reste fixe sur le *zéro* de la graduation.

2° Si les couples V et V′ sont de *nature différente*, c'est-à-dire si les métaux et les liquides qui entrent dans leur composition ne sont pas les mêmes, la force électromotrice e du couple V est nécessairement plus grande ou plus petite que la force électromotrice e' du couple V′. Lorsque

ces couples sont mis *en opposition*, l'expression de l'intensité du courant résultant

$$I = \frac{e - e'}{R}$$

n'est pas nulle. Elle est positive dans le cas où e l'emporte sur e', et négative dans le cas contraire. En d'autres termes, l'aiguille du galvanomètre placé dans le circuit est toujours déviée, et sa déviation correspond au sens du courant fourni par le couple dont la force électromotrice est la plus grande. Ce résultat est d'ailleurs complétement *indépendant des dimensions des couples employés*. Dans ce cas, les forces électromotrices de sens inverses n'ont pas la même intensité; le circuit est toujours traversé par un courant *résultant*, dont la force électromotrice est égale à la différence, $e - e'$, des forces électromotrices des couples *en opposition* V, V'.

Cela posé, il est évident que, si l'aiguille du galvanomètre placé dans le circuit de deux électromoteurs *en opposition* reste fixe à *zéro*, les deux forces électromotrices de sens contraires sont *égales*. Tel est le principe très simple de la méthode expérimentale de M. J. Regnauld.

Appareil de mensuration. — L'*unité* de comparaison choisie par M. J. Regnauld est la force électromotrice de son couple thermo-électrique bismuth et cuivre (t. I, p. 468), dont les soudures sont maintenues l'une à 100°, et l'autre à *zéro*. L'appareil employé dans ses recherches est (Fig. 310, 311) une pile thermo-électrique composée de *soixante* éléments remplissant toutes les conditions néces-

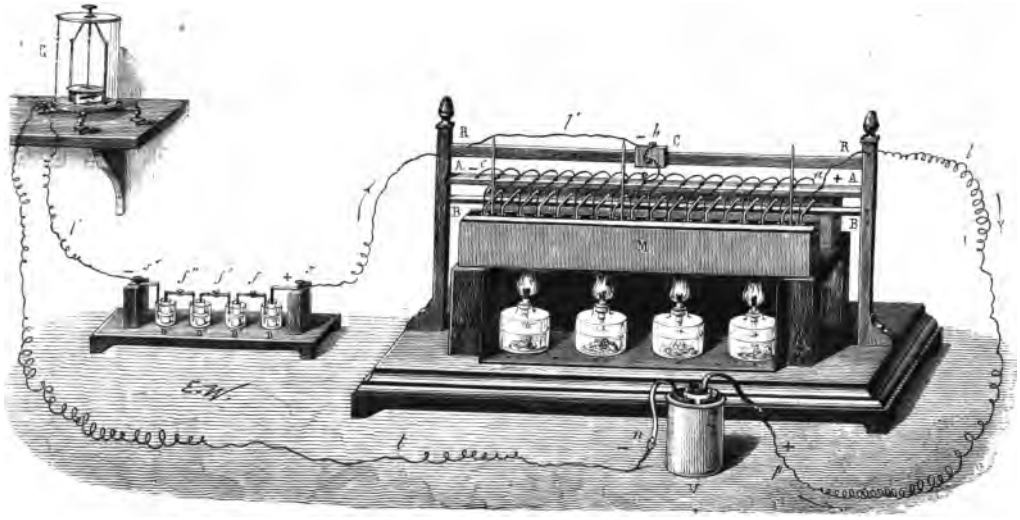


Fig. 310.

saires pour que les couples soient bien isolés, et pour que, du côté des soudures échauffées comme du côté des soudures refroidies, la température reste sensiblement constante pendant toute la durée de chaque expérience. Quand cette pile fonctionne dans son entier, sa force électromotrice est égale à *soixante unités*.

Les éléments de la pile sont supportés par deux règles de bois horizontales A, B, reliées et maintenues par deux montants de bois verticaux. Chaque bar-

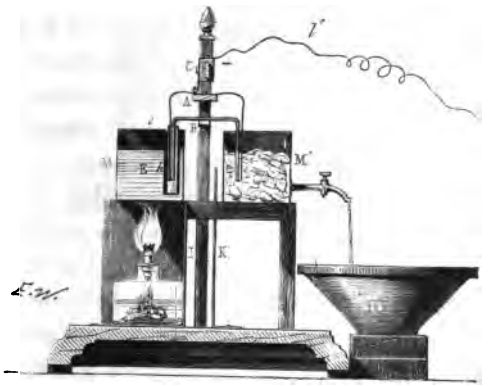


Fig. 311.

reau de bismuth repose, par sa partie horizontale, sur la tringle inférieure B. Les fils de cuivre sont relevés parallèlement aux branches verticales des barreaux de bismuth, et puis recourbés horizontalement ; ils sont ainsi ramenés vers le milieu de la tringle supérieure A, où ils sont réunis deux à deux par une vis de pression, de manière à former une chaîne thermo-électrique continue. Le fil

de cuivre de la première des soudures échauffées et celui de la dernière des soudures refroidies restent seuls *libres*, et sont fixés l'un en *a*, l'autre en *c* ; *a* est le pôle *positif* et *c* le pôle *négatif* de la pile entière.

Les montants verticaux portent une troisième tringle de bois horizontale R, sur laquelle glisse un curseur C. A ce curseur est fixé un fil de cuivre formant ressort, qui communique, par son extrémité fixe, avec le bouton métallique *b*, et qui, par son extrémité libre, vient s'appliquer successivement sur les divers fils de cuivre des couples thermo-électriques. Le bouton *b* est le pôle négatif de la portion *variable* de la pile thermo-électrique comprise entre son extrémité *a* et le fil de cuivre en contact avec le ressort du curseur C. Il est d'ailleurs évident qu'en faisant varier la position du curseur C, on peut augmenter ou diminuer à volonté le nombre des couples compris entre le pôle *positif a* et le pôle *négatif b*.

Les parties verticales des couples plongent dans deux longues cuves prismatiques M, M′ (fig. 312), destinées à maintenir une rangée de soudures à *zéro*, et l'autre à *cent degrés*. — L'auge M′ est remplie de glace fondante dans laquelle plongent les soudures de la première rangée ; un robinet permet de faire couler l'eau provenant de la glace fondue. Les branches verticales des éléments sont maintenues isolées les unes des autres, au moyen d'une couche de cire vierge complétement inaltérable dans l'eau froide.

L'auge prismatique M est plus compliquée dans sa construction ; elle se compose de deux cavités distinctes, dont les parois sont de cuivre rouge étamé en dedans. Dans la grande cavité E on verse de l'eau distillée ; la cavité *h* est

très étroite et reçoit les soudures de la seconde rangée. Cette cavité *h* est remplie de cire vierge, dans laquelle les branches verticales des éléments sont noyées; de plus, chacune de ces branches verticales est enveloppée d'un

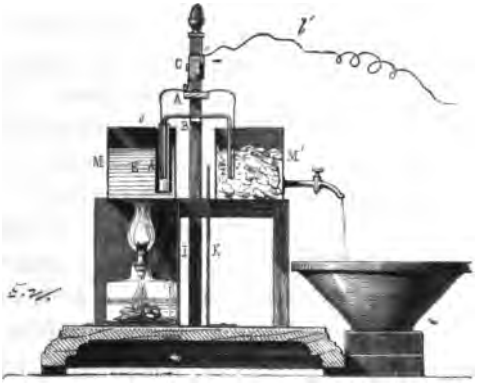


Fig. 312.

tube mince de verre ouvert par les deux bouts. De cette manière les couples sont parfaitement isolés les uns des autres; d'ailleurs la cire n'exerce aucune influence sur les métaux, à la température de l'eau bouillante.

Pour échauffer les soudures contenues dans l'auge M, on place au-dessous une série de lampes à alcool qui portent l'eau à la température de l'ébullition. La chaleur de l'eau bouillante fond la cire vierge, et, par son intermédiaire, se communique aux soudures de la cavité *h*. Trois thermomètres, plongés dans la cavité *h*, indiquent à chaque instant la température du bain de cire des soudures immergées. Un opercule incomplet *o*, placé à la

partie supérieure de l'auge M, empêche la vapeur d'eau bouillante de venir se condenser autour des éléments métalliques de la pile.

Une plaque de tôle I tapisse les parois latérales, postérieure et inférieure du compartiment destiné aux lampes à alcool; elle protége les supports de bois contre l'action de la flamme, et empêche l'air chaud de circuler dans l'intérieur de l'appareil. — Une lame épaisse d'ardoise K, disposée en écran, s'oppose à la propagation de la chaleur vers l'auge M' remplie de glace fondante.

La température des soudures plongées dans l'auge M' est évidemment *toujours la même*, et égale à celle de la glace fondante. Il n'en est pas ainsi des soudures plongées dans l'auge M. D'une part, à cause de la variation de la pression atmosphérique, le point d'ébullition de l'eau distillée n'est pas constant; d'autre part, il y a toujours une différence d'*un demi*-degré entre la température de l'eau bouillante de la grande cavité E et celle du bain de cire de la petite cavité *h*. Dans les expériences relatives à la mesure des forces électromotrices des couples hydro-électriques, M. J. Regnauld s'est assuré que ces légères variations de la température des soudures échauffées n'exercent pas d'effet sensible sur les résultats, et qu'on peut, sans erreur appréciable, considérer toutes ces soudures échauffées comme étant à *cent degrés*.

Mais les *soixante* couples de la pile thermo-électrique sont insuffisants, pour équilibrer et mesurer la force électromotrice de la plupart des couples hydro-électriques. Pour n'être pas obligé de trop multiplier les couples thermo-électriques, M. J. Regnauld a eu recours à l'emploi de

couples hydro-électriques *auxiliaires*, dont chacun représente un nombre connu de ses unités thermo-électriques. Il a choisi, pour élément hydro-électrique *auxiliaire*, un couple à deux liquides très constant et très faible. Le métal positif est du zinc *pur* plongé dans une dissolution saturée de sulfate de zinc; le métal négatif est du cadmium *bien pur* plongé dans une dissolution saturée de sulfate de cadmium; les deux dissolutions sont séparées par un diaphragme de porcelaine poreuse. Des expériences préalables lui ont prouvé que chacun de ces couples *auxiliaires* équivaut à *cinquante-cinq* couples thermo-électriques.

Cela posé, supposons qu'il s'agisse de déterminer la force électromotrice d'un couple de Daniell composé de zinc *amalgamé* plongé dans une dissolution d'*un volume* d'acide sulfurique monohydraté dans *dix volumes* d'eau, et de cuivre plongé dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre. On dispose l'expérience de la manière suivante :

Le bouton *b* du curseur C, jouant le rôle de pôle *négatif* de l'appareil thermo-électrique, est mis (Fig. 313) en communication, au moyen du fil *l'*, avec le pôle *positif s* d'une pile hydro-électrique de *quatre* éléments *auxiliaires D*, *D'*, *D''*, *D'''* (zinc pur, cadmium), que nous appellerons désormais *pile auxilliaire*. Le pôle *positif a* de la pile thermo-électrique est mis en communication, au moyen du fil *l*, avec le pôle *positif p* du couple de Daniell V. Les extrémités *t*, *t'* du fil du galvanomètre G sont fixées, l'une au pôle *négatif s'* de la *pile auxiliaire*, l'autre au pôle *négatif n* du couple de Daniell V.

Quand ces communications sont établies, le courant de

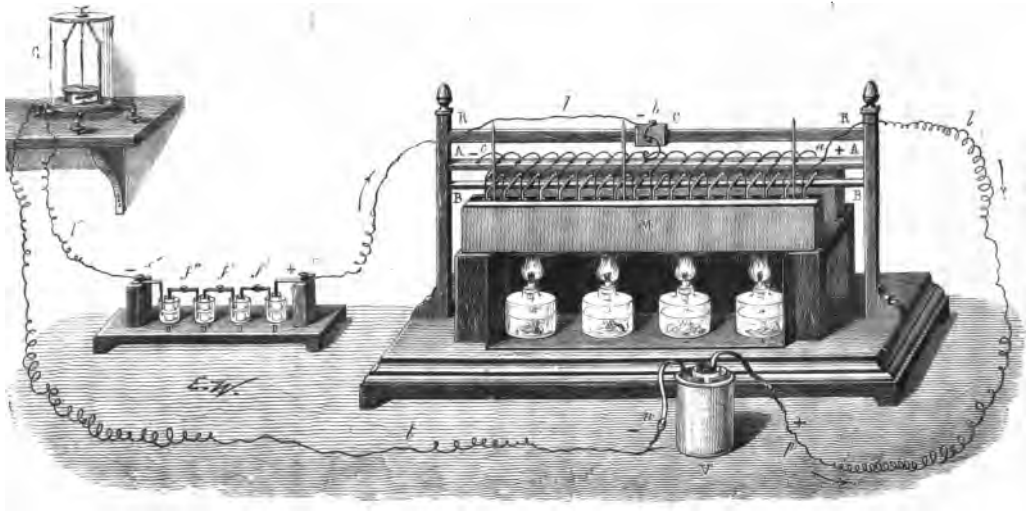


Fig. 313.

la *pile auxiliaire* et celui de la pile thermo-électrique marchent, l'un et l'autre, de *s* en *a*; ils s'ajoutent et forment un seul courant dirigé de *a* en *p* dans le fil *l*. Mais, d'autre part, le couple de Daniell V fournit un courant dirigé de *p* en *a* dans ce même fil *l*. Le couple de Daniell V est donc *en opposition* avec la pile thermo-électrique et la *pile auxiliaire*.

En faisant glisser le curseur C le long de la règle de bois R, et en fixant successivement le fil *t'* du galvanomètre aux boutons *s'*, *f''*, *f'*, *f*, *s*, on peut augmenter ou diminuer à volonté le nombre des couples thermo-électriques, et le nombre des couples *auxiliaires* compris dans le circuit et *opposés* au couple V. On peut donc toujours, par des tâtonnements successifs, introduire dans le circuit ces éléments *auxiliaires* et thermo-électriques en proportion telle que le courant *résultant* soit *nul*, et que l'aiguille du galvanomètre G reste fixe sur le *zéro* de la graduation. Évidemment alors, la somme des forces électromotrices des couples *auxiliaires* et thermo-électriques compris dans le circuit est égale à la force électromotrice du couple de Daniell V.

Quand le couple de Daniell V est composé, ainsi que nous l'avons dit, de zinc *amalgamé* plongé dans un mélange d'*une partie* d'acide sulfurique monohydraté et de *dix* parties d'eau, et de cuivre plongé dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre, l'expérience démontre que, pour ramener et maintenir à *zéro* l'aiguille du galvanomètre G, il faut comprendre dans le circuit *trois* couples *auxiliaires* et *quatorze* couples thermo-électriques. Or, puisque chaque couple *auxiliaire* équivaut à *cinquante-*

cinq couples thermo-électriques, et puisque la force électromotrice d'un couple thermo-électrique est prise pour *unité* de mesure, la force électromotrice cherchée E du couple de Daniell V est donnée par l'équation suivante :

$$E = 3 \times 55 + 14 = 165 + 14;$$

d'où

$$E = 179.$$

En soumettant les diverses combinaisons voltaïques à des essais semblables, on peut, dans chaque cas particulier, déterminer le nombre des couples *auxiliaires* et le nombre des couples thermo-électriques qu'il faut faire entrer dans le circuit pour ramener et maintenir l'aiguille du galvanomètre à *zéro*. Un couple quelconque étant donné, on peut donc toujours, par cette méthode, mesurer très exactement sa force électromotrice. Avant d'exposer les résultats fournis par l'application de cette méthode à l'étude des diverses combinaisons voltaïques à deux liquides, nous devons nous occuper de l'influence que certaines conditions de construction exercent sur l'intensité de la force électromotrice des couples.

1° *Influence de la dilution et de la nature des liquides.* — Quand le métal positif et le métal négatif plongent chacun dans la dissolution aqueuse d'un sel dont ce métal forme la base, la concentration de la dissolution saline qui correspond au métal positif peut varier dans des limites très étendues, depuis 1 jusqu'à 1/100, sans que la force électromotrice de la combinaison soit modifiée. L'influence de la concentration du sel dans lequel plonge le métal négatif est peu sensible ; toutefois les limites dans

lesquelles on peut la faire varier sans altérer la force électromotrice sont plus rapprochées que pour la solution saline qui correspond au métal positif.

Les métaux restant les mêmes, la force électromotrice varie avec la *nature* des dissolutions salines employées.

Quand le métal négatif reste plongé dans une dissolution saline dont il forme la base, la force électromotrice augmente si, à la dissolution *saline* dans laquelle plongeait le métal positif, on substitue l'*acide* qui entre dans la composition de ce sel.

2° *Influence des diaphragmes poreux.* — L'emploi des cloisons poreuses dans un élément voltaïque à deux liquides a pour effet incontestable de diminuer les sections des couches liquides du couple et, par suite, d'augmenter les résistances dans le même rapport. La présence du diaphragme affaiblit donc l'*intensité* du courant; et cet affaiblissement est d'autant plus considérable que la cloison poreuse interposée est moins perméable. M. J. Regnauld a étudié l'influence de ces diaphragmes sur la *force électromotrice;* dans ce but, il a employé successivement comme cloisons poreuses, tantôt de la baudruche, tantôt des cylindres de diverses épaisseurs de terre de pipe et de porcelaine dégourdie, tantôt enfin des tubes de diverses épaisseurs de bois de poirier, de palissandre, d'ébène et de buis. Il résulte de ses recherches que :

« Dans les piles à deux liquides, le diaphragme poreux » n'a pas d'influence sur la *force électromotrice*, si toute- » fois sa nature exclut toute réaction chimique sur les » liquides auxquels il donne accès. »

Forces électromotrices des combinaisons voltaïques à deux liquides. — Les études comparatives de M. J. Regnauld ont porté sur un certain nombre de combinaisons voltaïques à deux liquides. Le tableau suivant contient les valeurs de la force électromotrice de ces divers couples hydro-électriques telles qu'il les a déterminées.

COUPLE I. (*Zinc pur. — Cadmium.*)

		Force électromotrice.
Sulfate de zinc.....	Sulfate de cadmium...	55 unités.
Chlorure de zinc.....	Chlorure de cadmium..	42
Bromure de zinc.....	Bromure de cadmium..	42
Iodure de zinc.....	Iodure de cadmium....	45
Azotate de zinc.....	Azotate de cadmium...	42

COUPLE II. (*Zinc amalgamé. — Cadmium.*)

		Force électromotrice
Sulfate de zinc.....	Sulfate de cadmium...	58 unités.
Acide sulf. monohydraté, 1 vol.; 5 vol. d'eau..	Sulfate de cadmium...	59

COUPLE III. (*Zinc pur. — Cobalt.*)

		Force électromotrice;
Chlorure de zinc.....	Chlorure de cobalt.....	114 unités.
Azotate de zinc.....	Azotate de cobalt.....	94

COUPLE IV. (*Zinc pur. — Nickel.*)

		Force électromotrice.
Sulfate de zinc.....	Sulfate de nickel.....	127 unités.
Chlorure de zinc.....	Chlorure de nickel....	109
Azotate de zinc.....	Azotate de nickel.....	131

COUPLE V. (*Zinc pur. — Cuivre.*)

		Force électromotrice.
Sulfate de zinc.....	Sulfate de cuivre.....	175 unités.
Azotate de zinc.....	Azotate de cuivre.....	160
Acétate de zinc.....	Acétate de cuivre.....	175
Chlorure de zinc.....	Chlorure de cuivre....	175

COUPLE VI. (*Zinc amalgamé. — Cuivre.*)

		Force électromotrice
Acide sulf. monohydraté, 1 vol.; 10 vol. d'eau.	Sulfate de cuivre.....	179 unités.

COUPLE VII. (*Couple de Grove*).

Zinc amalgamé.	Platine.	Force électromotrice.
Acide sulf. monohydraté, 1 vol ; 10 vol. d'eau.	Acide azotique, 1 vol.; 5 vol. d'eau.....	310 unités.

COUPLE VIII. (*Zinc pur. — Aluminium.*)

		Force électromotrice.
Sulfate de zinc.....	Sulfate d'alumine.....	35 unités.

Ce tableau montre combien est grande l'influence de la *nature* du métal négatif sur la force électromotrice des couples à deux liquides, quand ce métal plonge dans une dissolution saline dont il forme la base; il fait voir aussi la liaison qui existe entre l'intensité de la force électromotrice et la nature des liquides actifs qui entrent dans la composition des couples. A propos des belles recherches de M. Joule et de M. Favre relatives aux effets calorifiques des courants, nous reviendrons sur les résultats précédents, et sur les rapprochements intéressants que M. J. Regnauld en a déduits.

§ II. — Forces électromotrices des appareils thermo-électriques.

Nous avons vu (t. I, page 453) qu'il suffit de maintenir à des températures différentes les soudures d'un circuit composé de deux métaux hétérogènes, pour donner naissance à une force électromotrice. Nous devons nous occuper ici des rapports qui existent entre l'intensité de cette force électromotrice et la différence de température des deux soudures du couple thermo-électrique.

Cette question a été étudiée par M. Becquerel (1). Dans ses expériences, l'une des deux soudures du couple thermo-électrique était constamment maintenue à *zéro*, l'autre soudure était portée à des températures successivement croissantes. Nous devons nous borner à mentionner les principaux résultats de son travail, sans entrer dans les détails des opérations.

1° Dans le couple *cuivre* et *fer*, l'intensité de la force électromotrice augmente moins vite que la différence de température des deux soudures. Quand la température de la soudure échauffée approche de 300°, les accroissements de la force électromotrice deviennent insensibles. Au-dessus de 300°, la force électromotrice demeure d'abord stationnaire, puis perd de son intensité à mesure que la différence de température augmente. Enfin, quand la température de la soudure échauffée est portée au rouge sombre, la force électromotrice change de *signe* et le sens du courant est *renversé*.

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 2e série, 1826, t. XXXI, p. 371. — *Traité d'électricité et de magnétisme*, 1855, t. I, p. 159.

M. Gaugain (1) a vérifié l'exactitude de ces résultats, il a montré de plus que les couples *argent* et *or*, *or* et *fer*, *argent* et *fer*, se conduisent comme le couple *cuivre* et *fer;* seulement le changement de sens du courant paraît s'opérer à une température plus basse pour les trois premiers couples que pour le dernier.

2° Dans le couple *argent* et *zinc*, l'intensité de la force électromotrice augmente, mais moins vite que la différence de température, jusqu'à ce que la soudure échauffée soit à 120°; elle décroît ensuite et, quand cette soudure est à 285°, tout courant cesse, la force électromotrice est *nulle*. Puis la force électromotrice change de *signe* et augmente graduellement, jusqu'à ce que la soudure échauffée ait atteint la température de fusion du zinc.

3° Le couple *or* et *zinc* présente des phénomènes de même nature. Seulement le *maximum d'intensité* et le *changement* de *signe* de la force électromotrice correspondent à des degrés différents de l'échelle thermométrique.

M. Gaugain a aussi expérimenté sur les couples *argent* et *zinc*, *or* et *zinc*. Contrairement aux résultats annoncés par M. Becquerel, il a trouvé que l'intensité du courant fourni par ces deux éléments thermo-électriques augmente constamment avec l'élévation de la température de la soudure échauffée, sans que le mouvement électrique éprouve de *changement de signe*.

4° Dans le couple *platine* et *palladium*, pour chaque accroissement égal de la différence de température, l'intensité de la force électromotrice augmente d'une même

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1853, t. XXXVI, p. 645.

quantité. Dans les expériences de M. Becquerel, la température de la soudure échauffée a varié entre *zéro* et 350°. Il paraît donc établi que, dans le couple thermo-électrique *platine* et *palladium*, la loi est la même pour les accroissements de la différence de température et pour les accroissements de l'intensité de la force électromotrice.

M. Pouillet (1) a particulièrement fixé son attention sur deux couples thermo-électriques, dont le premier lui a servi à mesurer les hautes températures, et le second à étudier les lois des courants électriques.

Dans les expériences sur le couple *platine* et *fer*, une des soudures était à la température ambiante, entre 15° et 20°, la seconde soudure était portée à des températures progressivement croissantes jusqu'à 1000°. L'intensité de la force électromotrice de ce couple n'est pas proportionnelle à la différence de température des deux soudures. En divisant l'intensité par la différence de température des deux soudures, M. Pouillet a déterminé, dans chaque expérience, l'intensité *moyenne* de la force électromotrice correspondante à *un* degré de différence dans les températures. Il a trouvé ainsi que, si la température de la soudure échauffée s'élève successivement de 100° à 1000°, l'intensité *moyenne* pour *un* degré *décroît* de 100° à 600°, puis augmente graduellement, et reprend à 1000° la valeur qu'elle avait aux environs de 100°.

M. Pouillet a prouvé, par des expériences directes, que la force électromotrice du couple *bismuth* et *cuivre* augmente proportionnellement à la différence de température des

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1836, t. III, p. 786. — 1837, t. IV, p. 515.

deux soudures, entre 80° *au-dessous* de zéro et 100° *au-dessus* de zéro.

Enfin, M. V. Regnault (1) a étudié avec beaucoup de soin la marche du couple *bismuth* et *antimoine*. Il a déduit de ses expériences deux conclusions importantes :

1° Quand les températures des soudures restent comprises entre 15° et 33°, une différence de température d'*un* degré développe toujours une force électromotrice de *même intensité*.

2° Toujours entre les mêmes points de l'échelle thermométrique, une augmentation d'*un* degré dans la différence des températures des deux soudures développe une force électromotrice d'autant plus *faible* que cette différence de température est elle-même plus *grande*.

Même aux températures ordinaires, on ne peut donc pas dire d'une manière rigoureuse que l'intensité de la force électromotrice du couple *bismuth* et *antimoine* augmente proportionnellement à la différence de température des deux soudures.

M. V. Regnault a repris, dans ce même travail, l'étude du couple *platine* et *fer*. Après avoir vérifié l'exactitude des observations de M. Pouillet, il a montré que les résultats de trois séries d'expériences faites avec un même appareil n'étaient pas exactement *comparables*. Ces essais étaient faits avec un couple dont les métaux étaient *soudés à l'argent*. M. V. Regnault, pour écarter les perturbations qui pourraient provenir de la présence d'un métal étranger, l'*argent*, dans les soudures, a répété les mêmes essais

(1) *Relation des expériences entreprises par ordre de M. le ministre des travaux publics, etc.*, 1847, 1re part., p. 256.

avec un couple dont les métaux avaient été réunis *directement* par incorporation au *rouge soudant*. La marche de ce second appareil a présenté des écarts moins considérables que celle du premier; cependant l'absence de tout métal étranger dans les soudures n'a pas suffi pour rendre les résultats exactement *comparables*.

Cette discussion nous conduit à dire avec M. V. Regnault:

Nous sommes encore loin de connaître toutes les circonstances qui influent sur la production des courants thermo-électriques, et de pouvoir fixer les conditions dans lesquelles les éléments thermo-électriques doivent être établis, pour que l'intensité de la force électromotrice développée dépende uniquement de la différence de température des soudures.

En présence de toutes ces anomalies, on comprend combien il devenait nécessaire de s'assurer directement de l'exactitude des indications fournies par l'appareil thermo-électrique employé comme moyen de mesurer les intensités des forces électromotrices. Cette vérification a été faite avec beaucoup de soin par M. J. Regnauld dans sa thèse déjà citée.

Il s'est d'abord assuré que l'intensité de la force électromotrice de son couple thermo-électrique était indépendante de la *forme* et des *dimensions* des éléments employés.

Il a ensuite opposé *un* à *un*, *deux* à *deux*, les divers couples de sa pile thermo-électrique, en les plaçant dans le circuit d'un galvanomètre très sensible. Il a prouvé que tous ces couples étaient de *même force*. En effet, le plus grand écart qu'il ait observé dans cette série de

comparaisons ne s'est jamais élevé à *un centième* de la valeur prise pour *unité*.

Par conséquent, lorsque les soudures sont faites directement et sans interposition de métal étranger ; lorsque, d'ailleurs, les éléments sont bien isolés les uns des autres, la force électromotrice d'un couple *bismuth* et *cuivre*, dont les soudures sont maintenues l'une à *zéro* et l'autre à 100°, est une quantité *constante*. Cette force électromotrice peut donc être prise pour *unité* de mesure.

ARTICLE VI.

MESURE DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ EN MOUVEMENT.

M. Pouillet a publié (1) un travail très important sur l'évaluation de la quantité d'électricité mise en mouvement dans un courant donné, et de la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un poids donné d'eau.

Quantité d'électricité des courants. — Lorsque l'intensité d'un courant reste *constante*, il est évident que la quantité d'électricité qui traverse un circuit donné est proportionnelle au temps pendant lequel le courant passe. Cela posé, soit V (Fig. 314) un couple à courant constant. R est une roue de bois qu'on peut faire tourner sur son axe, au moyen de la manivelle M. La jante de la roue est recouverte d'une virole de cuivre dont une moitié est pleine, et dont l'autre moitié est découpée en un nombre déterminé de dents. Ces dents sont toutes égales, et sont

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1837, t. IV, p. 787.

séparées par des espaces vides de même largeur que les dents métalliques elles-mêmes. Une languette métallique *l* communique avec un des pôles du couple, et appuie constamment sur la partie découpée de la virole ; une seconde languette métallique *l'* communique avec l'autre pôle du

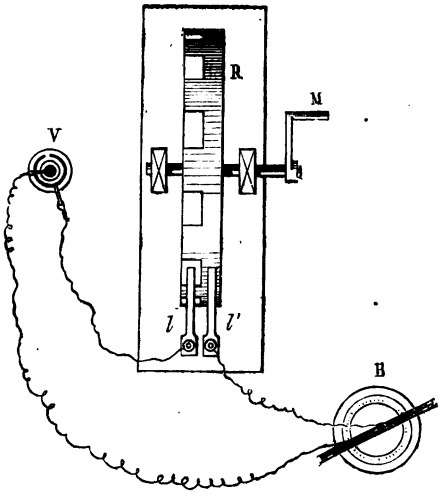


Fig. 314.

couple, et correspond, par son extrémité libre, à la partie pleine de la virole. Soit, en outre, B une boussole des sinus placée dans le circuit.

Quand la roue R est au repos, si la languette *l* appuie sur une dent métallique, le circuit est fermé, le courant passe et l'aiguille de la boussole est déviée ; mais, si la languette *l* repose sur le bois qui sépare deux dents consécutives, la communication n'existe plus, le courant est inter-

rompu, l'électricité ne passe pas, et l'aiguille de la boussole retombe à *zéro*.

Quand la roue R est en mouvement, l'extrémité libre de la languette métallique *l* correspond alternativement à une dent métallique et à un des espaces isolants placés entre ces dents ; par conséquent, le circuit est alternativement *fermé* et *interrompu*. D'ailleurs, puisque les dents métalliques et les espaces isolants qui les séparent ont la même largeur, tant que dure la rotation de la roue le circuit reste alternativement *fermé* et *interrompu* pendant des temps *égaux*.

Lorsque la roue est en mouvement, le circuit livre donc passage à une quantité d'électricité égale *seulement à la moitié* de celle qui le traverserait, dans le même temps, s'il restait *fermé d'une manière permanente*.

Soit *d* l'angle de déviation de l'aiguille de la boussole B, quand le circuit est *fermé d'une manière permanente*. Faisons tourner la roue, le circuit est alternativement fermé et interrompu, et le courant *ne passe que d'une manière intermittente*. Si la rotation est lente, ces alternatives sont traduites par des oscillations de l'aiguille aimantée, dont l'amplitude diminue à mesure que le mouvement s'accélère. Pour une certaine vitesse, l'aiguille cesse d'osciller et se maintient dans une position *fixe* d'écartement angulaire. A partir de cette limite inférieure, la déviation de l'aiguille reste *constante*, quelque grande que devienne la vitesse de rotation. Soit d' l'angle de déviation, quand la vitesse de rotation est assez grande pour que, sous l'influence du courant interrompu, l'aiguille de la boussole B prenne une position *fixe*.

L'expérience démontre que sin. *d* est *double* de sin. *d'*, c'est-à-dire que l'intensité du courant *continu* est *double* de celle du courant *interrompu*. Or, que le circuit reste fermé d'une manière continue ou qu'il soit périodiquement interrompu, sa résistance et la force électromotrice du couple V conservent évidemment les mêmes valeurs. Cette supériorité du courant *continu* sur le courant *interrompu* doit donc provenir uniquement de la diminution que les interruptions successives du circuit font éprouver à la quantité d'électricité qui traverse l'ensemble du système.

De cette expérience, et d'observations de même nature faites avec des roues mobiles dans lesquelles la largeur des dents métalliques et l'étendue des espaces isolants avaient d'autres rapports, il résulte que :

1° La quantité d'électricité fournie, dans l'unité de temps, par un courant de force constante est proportionnelle à l'intensité de ce courant.

2° Le produit de l'intensité d'un courant de force constante par le temps pendant lequel il circule, est proportionnel à la quantité d'électricité fournie par le courant dans le même intervalle de temps.

Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau. — Dans le circuit d'une pile de force *constante*, M. Pouillet a placé une boussole des sinus, et un voltamètre à eau acidulée avec de l'acide sulfurique. Dans ces expériences, il a pris successivement pour électrolytes des dissolutions à divers degrés de concentration, et, dans chaque cas, il a laissé passer le courant pendant un temps suffisant pour que la quantité d'hydrogène dé-

gagé restât la *même*. Dans chaque observation, l'intensité du courant était fournie par le sinus de l'angle de déviation de l'aiguille de la boussole, et le produit du temps par l'intensité était pris pour mesure de la quantité d'électricité qui traversait l'électrolyte. Or, malgré les variations qu'éprouve la résistance du circuit par le fait des variations de composition de l'électrolyte, le produit du temps par l'intensité est resté *constant*. D'où il résulte que :

Quelles que soient l'intensité du courant et la composition de l'électrolyte employé, *une même quantité* d'électricité dynamique est toujours nécessaire et suffisante pour décomposer *une même quantité* d'eau.

M. Pouillet a pris, pour *unité électrique*, la quantité d'électricité fournie, en *une minute*, par un couple *bismuth* et *cuivre*, dont les soudures sont maintenues l'une à *zéro* et l'autre à 100°, lorsque la résistance du circuit est égale à celle d'un fil de cuivre d'*un millimètre* de diamètre et de *vingt mètres* de longueur. En tenant compte, dans chaque expérience, de la résistance du circuit traversé par le courant, il est arrivé à cette conclusion remarquable :

Dans tous les cas, la *quantité* d'électricité dynamique nécessaire et suffisante pour décomposer *un gramme* d'eau est égale à 13 787 *unités électriques*.

Mesure de l'équivalent électrique. — L'*équivalent électrique* est la quantité d'électricité dynamique nécessaire pour décomposer *un équivalent chimique d'eau*. Si nous prenons *un milligramme* pour poids de l'équivalent chimique de l'hydrogène, l'*équivalent chimique de l'eau*

pèse nécessairement *neuf milligrammes*. Par conséquent, l'*équivalent électrique* est égal à :

$$\frac{13787 \times 9}{1000} \quad \text{ou} \quad 124 \text{ unités électriques.}$$

Si maintenant nous nous reportons à ce que nous avons dit (tome Ier, page 519 et suiv.) des lois de l'action électrolytique *définie* des courants, nous pouvons les résumer dans cette formule générale :

Dans un électromoteur hydro-électrique en action, la dissolution d'un *équivalent chimique* du métal positif dans chaque couple produit *un équivalent d'électricité dynamique*, et cet *équivalent électrique* peut mettre en liberté un *équivalent chimique* de l'élément négatif d'un électrolyte quelconque placé dans le circuit interpolaire.

Comparaison des piles hydro-électriques et des machines électriques à plateau de verre. — M. Faraday (1) a mesuré la quantité d'électricité statique nécessaire pour décomposer un poids donné d'eau. A cet effet, il s'est servi d'une batterie électrique composée de *quinze* jarres égales. Chaque jarre était assez grande pour que son armure extérieure et son armure intérieure eussent, l'une et l'autre, 184 pouces carrés anglais de surface. Cette batterie était chargée par *trente* tours de roue d'une forte et puissante machine à plateau de verre.

Il fallut 800 000 décharges de cette batterie pour opérer

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 84, § 291; p. 253, § 860 et 861.

la décomposition d'une quantité d'eau représentée par *un grain anglais*. Or,

1 pouce anglais vaut.... 2centim.,53995
1 gramme vaut..... 15grains,4325 (mesure anglaise).

Il en résulte que, pour décomposer *un gramme* d'eau, il faudrait toute l'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde chargée au même degré de tension que la batterie de *quinze* jarres de M. Faraday, et dont chaque armure métallique aurait une surface de

21 964 430 mètres carrés.

Pour décomposer *un équivalent* ou *neuf milligrammes* d'eau, il faudrait donc toute l'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde chargée au même degré de tension, et dont chaque armure aurait une surface de

$$\frac{21964430 \times 9}{1000} \text{ ou } 197\,680 \text{ mètres carrés.}$$

M. Becquerel (1) a appliqué une autre méthode expérimentale à l'examen de la même question. Il résulte de ses recherches que, pour décomposer *un équivalent* ou *neuf milligrammes* d'eau, il faudrait toute l'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde se déchargeant spontanément à 11mm,28 de distance, et dont chaque armure aurait une surface de

180 571 mètres carrés.

M. Verdet (2) a fait connaître les résultats des recherches

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1846, t. XXII, p. 400.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1857, t. XLIX, note de la page 118.

entreprises, en 1853, par M. Buff sur ce même sujet. D'après ces expériences, pour décomposer *un équivalent* ou *neuf milligrammes* d'eau, il faudrait toute l'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde, qui se déchargerait spontanément par une étincelle produite entre deux boules de *vingt-cinq* millimètres de diamètre à une distance de *cent* millimètres, et dont chaque armure aurait une surface de

11 370 mètres carrés.

En admettant que la charge d'un condensateur varie en raison directe de la distance explosive, cette évaluation de M. Buff porte à conclure que, pour décomposer *un équivalent* d'eau, il faudrait toute l'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde se déchargeant spontanément à *dix* millimètres de distance, et dont chaque armure aurait une surface de

113 700 mètres carrés.

Ces recherches conduisent à trois évaluations différentes de la quantité d'électricité statique qui représente *un équivalent* d'électricité dynamique. En effet, *un équivalent* d'électricité dynamique serait égal :

1° D'après M. Faraday et dans les conditions de tension par lui définies, à la charge d'une bouteille de Leyde dont chaque armure aurait une surface de

197 680 mètres carrés.

2° D'après M. Becquerel, à la charge d'une bouteille de

Leyde se déchargeant spontanément à une distance de $11^{mm},28$, et dont chaque armure aurait une surface de

180 571 mètres carrés.

3° D'après M. Buff, à la charge d'une bouteille de Leyde se déchargeant spontanément à une distance de 10 millimètres, et dont chaque armure aurait une surface de

113 700 mètres carrés.

Les grandes différences qui existent entre ces trois évaluations de l'*équivalent* d'électricité dynamique doivent être attribuées aux imperfections des méthodes employées. En effet, MM. Faraday, Becquerel et Buff ont pris, tous les trois, pour *unité*, la quantité d'électricité accumulée sur une bouteille de Leyde de grandeur donnée, soit quand la charge a été communiquée au condensateur par un certain nombre de tours de révolution du plateau d'une machine, soit quand la tension est suffisante pour que la décharge s'effectue spontanément entre les deux armures à une distance connue. Mais la nature et l'épaisseur du verre des bouteilles de Leyde employées, le poli, le diamètre et la forme des surfaces entre lesquelles s'effectue la décharge; et beaucoup d'autres circonstances impossibles à définir exactement, influent sur la quantité d'électricité fixée par le condensateur. Il n'est donc pas permis d'admettre que l'*unité* choisie par chaque observateur soit restée rigoureusement la même pendant toute la durée des expériences; à plus forte raison, ne devons-nous pas considérer, comme *comparables*, les trois *unités* qui servent

de base à ces trois évaluations de l'*équivalent* d'électricité dynamique.

Mais, si les résultats précédents ne donnent pas une évaluation exacte de l'*équivalent* d'électricité dynamique, ils suffisent pour montrer combien la *quantité* d'électricité fournie, dans un temps donné, par une machine à plateau de verre, est faible en comparaison de celle qui, dans le même temps, traverse le circuit d'une pile hydro-électrique.

Ce dernier fait est rendu bien plus évident encore par les mesures consignées dans un mémoire de MM. Weber et Kohlrausch, sur *la réduction aux unités mécaniques des mesures d'intensité des courants* (1). Il résulte des recherches expérimentales de ces deux habiles physiciens, que :

La quantité d'électricité positive fournie par une pile hydro-électrique pour opérer la décomposition d'*un équivalent* ou de *neuf milligrammes* d'eau, accumulée sur un nuage placé à *un kilomètre* de la surface de la terre, et agissant sur une quantité égale d'électricité négative accumulée à la surface de la terre au-dessous du nuage, exercerait une attraction égale à 2268 000 kilogrammes.

Mais si, aux *quantités* d'électricité, nous substituons les *tensions* des charges électriques comme point de comparaison, les machines électriques à plateau de verre prennent une très grande supériorité sur les piles hydro-électriques. Ainsi, M. Gassiot (2) a montré que, même en prenant toutes les précautions nécessaires pour obtenir un

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1857, t. XLIX, p. 115.
(2) *Bibl. univers. de Genève*, 1846, t. III, p. 44.

isolement complet des diverses pièces de l'appareil, il ne faut pas moins de 4000 couples de Grove, associés en une série unique, pour fournir, *avant le contact*, une étincelle de *un millimètre* de longueur entre deux surfaces métalliques en communication avec les pôles de l'électromoteur. —Lorsque, dans cette expérience, les surfaces métalliques sont remplacées par des fragments de charbon, les pièces polaires doivent être rapprochées à environ un *demi-millimètre* de distance, pour qu'elles échangent une étincelle *avant le contact*.

Tout le monde sait, au contraire, qu'avec une bonne machine à plateau de verre, quand l'atmosphère n'est pas trop humide, on peut facilement obtenir des étincelles de *vingt-cinq* à *trente centimètres* de longueur, entre les conducteurs de la machine et une sphère en communication avec les coussins.

Ces faits établissent d'une manière incontestable que :

1° Les machines électriques à plateau de verre sont des appareils qui fournissent, *sous une très forte tension*, de *très faibles quantités* d'électricité.

2° Les piles hydro-électriques sont des appareils qui fournissent, *sous une très faible tension*, des *quantités très considérables* d'électricité.

CHAPITRE V.

INDUCTION ÉLECTRO-DYNAMIQUE ET MAGNÉTO-ÉLECTRIQUE.

Partant des idées émises par Ampère sur la constitution des aimants, et des propriétés dont jouissent les courants voltaïques de développer la force magnétique dans les barreaux d'acier et de fer doux, M. Faraday fut conduit à rechercher si les aimants ne pourraient pas, à leur tour, développer des courants électriques dans les conducteurs soumis à leur influence. L'expérience ne tarda pas à justifier l'exactitude de ses prévisions. En 1831 (1), il découvrit les *courants d'induction*, et démontra que les courants voltaïques possèdent l'*action inductrice* aussi bien que les aimants. En 1834, M. Masson compléta la belle découverte de M. Faraday, en prouvant que les décharges d'électricité statique exercent une *action inductrice* du même genre sur les conducteurs voisins.

ARTICLE PREMIER.

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION DANS LES FILS MÉTALLIQUES.

Pour développer des phénomènes d'induction dans un circuit composé de fils métalliques, on emploie tantôt des courants voltaïques, tantôt des barreaux aimantés ou des

(1) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, 1832, t. L, p. 5 et 113; — t. LI, p. 404.

électro-aimants, tantôt des décharges d'électricité statique. Les courants *induits*, quelle que soit leur origine, peuvent exercer, à leur tour, une *action inductrice* sur un circuit métallique voisin. Nous devons nous occuper, dans cet article, de l'étude des circonstances au milieu desquelles ces phénomènes prennent naissance.

§ Ier. — Action inductrice des courants voltaïques.

Soient (Fig. 315), AB, CD, deux longs fils de cuivre parallèles, très rapprochés et fixés sur une planche isolante de bois. CD est en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre G ; AB sert à fermer le

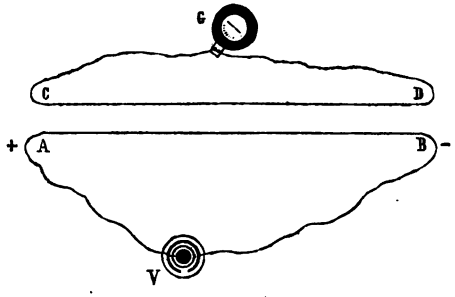


Fig. 315.

circuit d'un électromoteur V. — Au moment où le courant *commence* et s'*établit* en AB, l'aiguille du galvanomètre est déviée, et accuse l'existence d'un courant *induit* qui traverse CD dans un sens *opposé* à celui du courant *inducteur* AB. — Immédiatement l'aiguille aimantée rétrograde, se fixe sur le *zéro* après quelques oscillations, et

persiste dans cette position tant que *dure* le courant voltaïque AB. — Au moment où le circuit de la pile est *rompu*, le courant *inducteur* AB *cesse*, l'aiguille du galvanomètre est de nouveau déviée, mais ce second courant *induit* développé dans le fil CD est de *même sens* que le courant *inducteur* qui vient de *cesser* en AB. D'ailleurs, comme dans le cas précédent, l'aiguille aimantée retombe immédiatement à *zéro*.

Appelons *direct* ou *positif* le courant *induit* dont le sens est le même que celui du courant *inducteur*, et *inverse* ou *négatif* le courant *induit* dont le sens est *contraire* à celui du courant *inducteur*. Les faits précédents montrent que :

1° Tout courant voltaïque agit *par induction* sur un conducteur voisin, au moment où il *commence* et au moment où il *finit;* les deux courants *induits* ainsi développés sont *instantanés* et de *sens contraires;* tant que le courant voltaïque *persiste*, il n'exerce aucune *action inductrice*.

2° Tout courant voltaïque qui *commence* développe, dans un circuit fermé, un courant *induit inverse* ou *négatif;* tout courant voltaïque qui *finit* développe un courant *induit direct* ou *positif*.

L'action inductrice atteint son *maximum* quand les deux fils sont *parallèles*, et devient *nulle* quand leurs directions sont et restent *rectangulaires*. Pour des positions intermédiaires, l'action inductrice varie en sens inverse de l'angle compris entre les deux fils.

Les effets sont les mêmes quand, au lieu de tendre les fils en ligne droite, on les dispose, à côté l'un de l'autre, en *zigzags* parallèles (Fig. 316).

Les deux fils restant fixes dans la même position relative, supposons qu'on *augmente* et qu'on *affaiblisse* successivement l'*intensité* du courant voltaïque dans le fil AB.

Au moment où l'*intensité* du courant *inducteur* AB

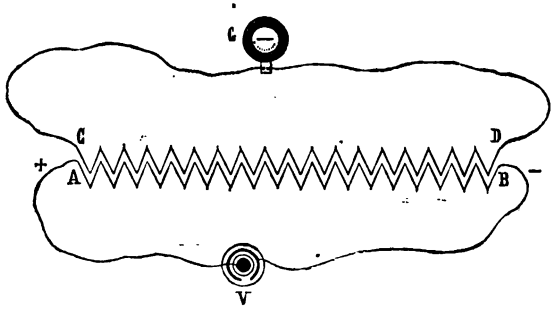


Fig. 316.

augmente, il se développe, en CD, un courant *induit inverse* ou *négatif;* au moment où l'intensité du courant *inducteur* AB *diminue*, il se développe, en CD, un courant *induit direct* ou *positif*. Tant que l'*intensité* du courant *inducteur* ne *varie pas*, il n'y a pas d'effet d'*induction* produit.

Les fils CD et AB, pliés en *zigzag* (fig. 316), étant fixés sur des planches de bois séparées et placées à distance, faisons communiquer le premier avec les extrémités d'un galvanomètre, et le second avec les pôles d'une pile; puis *rapprochons* et *écartons* rapidement le fil AB du fil CD, en leur conservant toujours des directions parallèles.

Au moment où le courant *inducteur* AB est vivement *rapproché*, il se développe, en CD, un courant *induit inverse* ou *négatif*. Pendant ce premier temps de l'opéra-

tion, le courant *inducteur* et le courant *induit* sont *parallèles* et de *sens inverses;* leur réaction électro-dynamique est donc *répulsive*, et *contrarie* le mouvement de rapprochement des fils AB, CD.

Au moment où le courant *inducteur* AB est vivement *éloigné*, il se développe, en CD, un courant *induit direct* ou *positif*. Pendant ce second temps de l'opération, le courant *inducteur* et le courant *induit* sont parallèles et de *même sens;* leur réaction électro-dynamique est donc *attractive*, et *contrarie* encore le mouvement d'éloignement des fils AB, CD.

Enfin, tant que la *distance* des fils AB, CD *ne varie pas*, il n'y a pas d'effet d'*induction* produit.

Ainsi, en résumé :

1° Un courant qui *commence*, un courant dont l'intensité *augmente*, un courant qui se *rapproche*, agissent de la même manière sur un fil métallique voisin, et développent toujours un courant *induit inverse* ou *négatif*.

2° Un courant qui *finit*, un courant dont l'intensité *diminue*, un courant qui s'*éloigne*, exercent le même genre d'action sur un fil métallique voisin, et développent toujours un courant *induit direct* ou *positif*.

Soient maintenant AB, DE (Fig. 317), deux fils métalliques horizontaux, très rapprochés et placés dans des directions *rectangulaires*. AB ferme le circuit d'une pile, et DE complète le circuit d'un galvanomètre.

Tout en maintenant DE dans le même plan vertical, nous pouvons rapprocher ou éloigner ce fil de AB, ou même le faire tourner autour du point d'entrecroisement C.

Par raison de symétrie, il ne se développe aucune trace d'*induction* dans le fil DE.

Mais, si nous faisons tourner DE autour du point d'entrecroisement C et dans un plan horizontal, la position angulaire relative des deux conducteurs change à chaque instant, et l'*induction* se développe. Dans ce mouvement de révolution, le fil AB reste immobile, et le fil DE prend successivement les quatre positions représentées dans les

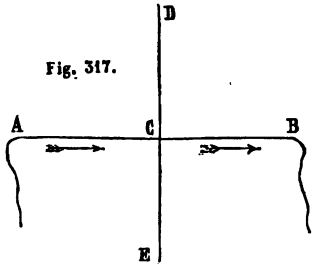


Fig. 317.

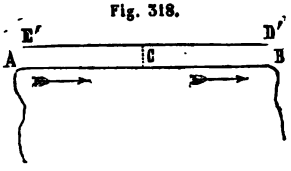


Fig. 318.

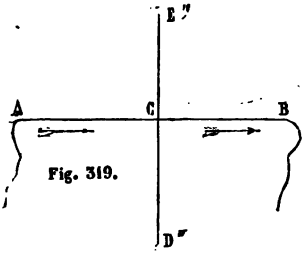


Fig. 319.

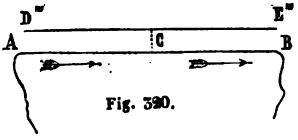


Fig. 320.

Figures 317, 318, 319, 320. La déviation de l'aiguille du galvanomètre montre que :

Dans le premier quart de révolution, pendant que le fil *induit* passe de la position DE à la position D'E', le courant *induit* circule de D en E; par conséquent, la réac-

tion électro-dynamique du courant inducteur et du courant induit est *répulsive*, et *contrarie* le mouvement de déplacement du fil DE.

Dans le deuxième quart de révolution, pendant que le fil *induit* passe de la position D'E' à la position D''E'', le courant *induit* change de sens et marche de E en D ; la réaction électro-dynamique des deux courants devient donc *attractive*, et *contrarie* encore le mouvement de déplacement du fil DE.

Dans le troisième quart de révolution, pendant que le fil *induit* passe de la position D''E'' à la position D'''E''', le courant *induit* conserve le même sens et continue à marcher de E en D; mais, par ce fait même, la réaction électro-dynamique des deux courants devient *répulsive*, et *contrarie* le mouvement de déplacement du fil DE.

Enfin, dans le quatrième quart de révolution, pendant que le fil *induit*. passe de la position D''' E''' à la position *primitive* DE, le courant induit change de sens et marche de D en E; dès lors, la réaction électro-dynamique des deux courants est *attractive*, et *contrarie* toujours le mouvement de déplacement du fil DE.

Si, pour point de départ du mouvement de révolution, nous prenons la position D'E' dans laquelle le fil *induit* et le fil *inducteur* sont parallèles, nous voyons que :

Dans la première demi-révolution, pendant que le fil *induit* passe de la position D'E' à la position D'''E''', le courant induit marche de E en D.

Dans la deuxième demi-révolution, pendant que le fil *induit* passe de la position D'''E''' à la position D'E', le courant induit change de sens, et marche de D en E.

D'ailleurs, pendant la première comme pendant la deuxième demi-révolution, la réaction électro-dynamique du courant *induit* et du courant *inducteur contrarie* toujours le mouvement de déplacement du fil DE.

Spirales planes et cylindriques. — Pour obtenir des courants induits d'une grande intensité, il faut employer des fils métalliques d'une longueur considérable. Au lieu de tendre ces longs fils en face les uns des autres, on les recouvre d'une enveloppe isolante de soie et on les replie sur eux-mêmes de manière à faire des spirales. On peut donner à ces spirales deux formes différentes.

La Figure 321 représente deux spirales *planes* portées sur des pieds isolants. Dans chacune d'elles, le fil de cuivre roulé en spirale est entouré de soie, et fixé sur une couche de cire étendue à la surface d'un disque mince de bois, ou cousu avec soin sur un morceau de drap de laine qu'on colle au disque de bois avec du vernis à la gomme laque. De cette manière, les tours de spire sont suffisamment isolés les uns des autres. La spirale A communique, par ses deux extrémités, avec les pôles d'un électromoteur V: c'est la spirale *inductrice*. La spirale B complète le circuit d'un galvanomètre G : c'est la spirale *induite*.

Plaçons deux spirales planes en face l'une de l'autre et à très petite distance; les fils sont évidemment dans la position convenable pour que l'action inductrice puisse se manifester. — Au moment où le circuit de la spirale inductrice A est fermé, la spirale induite B est traversée par un courant *induit inverse* ou *négatif;* puis, l'aiguille du galvanomètre retombe immédiatement à *zéro*. — Au mo-

ment où le circuit de la spirale inductrice A est rompu, la spirale induite B est traversée par un courant *induit direct* ou *positif*, également *instantané*.

Plaçons les deux spirales planes en face l'une de l'autre et à une grande distance. — Au moment où la spirale in-

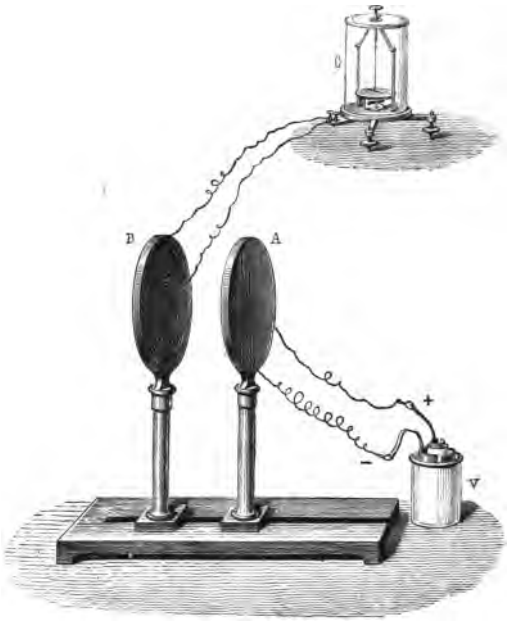


Fig. 321.

ductrice A est vivement rapprochée, la spirale induite B est traversée par un courant *induit inverse* et *instantané*. — Au moment où la spirale inductrice A est vivement éloignée, la spirale induite B est traversée par un courant *induit direct* et *instantané*.

La Figure 322 représente deux spirales *cylindriques* ou *bobines*. Chacune d'elles se compose d'un fil de cuivre recouvert de soie, enroulé en hélice sur un cylindre creux de bois ou de carton. Les extrémités du fil sont en communication avec deux boutons métalliques fixés à la partie

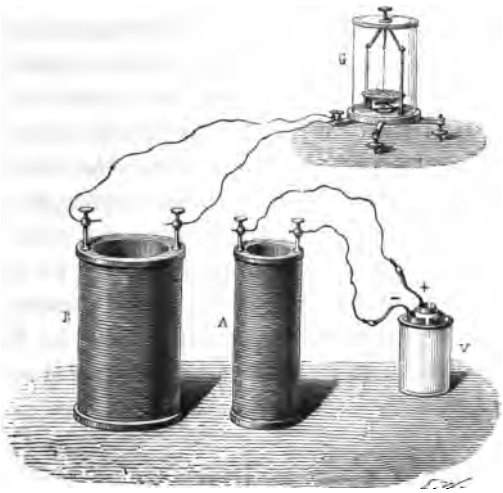


Fig. 322.

supérieure de la *bobine ;* ces boutons servent à faire entrer la spirale dans le circuit d'un électromoteur V ou d'un galvanomètre G, suivant qu'elle doit servir d'appareil *inducteur* ou d'appareil *induit*.

Avec ces spirales cylindriques, on peut obtenir des courants induits d'une grande intensité, dont les faits précédents permettent de prévoir le sens. En effet :

1° Si la spirale inductrice A est placée dans la cavité

de la spirale induite B, les fils sont parallèles dans les deux systèmes. Alors : — Au moment où le circuit de la spirale inductrice A est fermé, la spirale induite est traversée par un courant *induit inverse*. — Au moment où le circuit de la spirale inductrice A est *rompu*, la spirale induite B est traversée par un courant *induit direct*.

2° Plaçons les deux spirales cylindriques l'une au-dessus de l'autre, de manière que leurs axes soient sur une même droite. — Au moment où la spirale inductrice A est vivement rapprochée, la spirale induite B est traversée par un courant *induit inverse*. — Au moment où la spirale inductrice A est vivement éloignée, la spirale induite B est traversée par un courant *induit direct*.

D'ailleurs, avec les spirales planes et avec les spirales cylindres, l'*augmentation* et la *diminution* d'intensité du courant *inducteur* produisent exactement les mêmes effets d'*induction* qu'un courant qui *commence* et un courant qui *finit*.

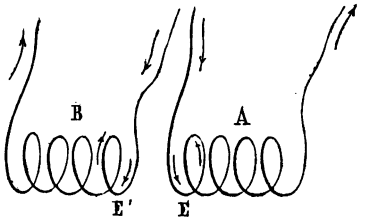


Fig. 523.

Arrêtons-nous sur le cas où une spirale inductrice cylindrique A est successivement rapprochée et éloignée d'une autre spirale cylindrique B, soumise à son

action (Fig. 323, 324). Les flèches indiquent le sens des courants dans les deux spirales.

1° Au moment où la spirale inductrice A est rapprochée (Fig. 323), son extrémité E, tournée vers la spirale B, représente un *pôle boréal*. Dès lors, la spirale induite B étant traversée par un courant *induit inverse*, son extrémité correspondante E′ représente nécessairement aussi un *pôle boréal*. Donc, au moment du *rapprochement* des deux spirales, leurs deux extrémités en présence E, E′ se *repoussent*.

2° Au moment où la spirale inductrice A est éloignée (Fig. 324), son extrémité E continue à représenter

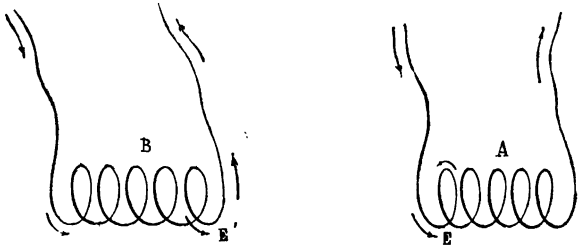


Fig. 324.

un *pôle boréal*, puisque le courant *inducteur* ne change pas de sens. Mais, alors, le courant *induit* est *direct*, et l'extrémité E′ de la spirale induite B devient un *pôle austral*. Donc, au moment de l'*écartement* des deux spirales, leurs extrémités en présence E, E′ s'*attirent*.

Les mêmes phénomènes de *répulsion* et d'*attraction* se produisent évidemment, au moment du *rapprochement* et de l'*écartement* de deux spirales planes. Ainsi donc :

Pour les spirales comme pour les simples fils rectilignes, la réaction électro-dynamique du circuit *induit* sur le circuit *inducteur* tend à pousser les deux systèmes *en sens inverse* du mouvement réel des deux circuits qui développe l'induction.

Les faits précédents établissent qu'un simple mouvement relatif d'un circuit voltaïque et d'un circuit métallique fermé suffit pour développer un courant d'*induction* dans ce dernier circuit. Nous avons vu d'ailleurs que, conformément aux observations déjà anciennes de Nobili (1), la réaction électro-dynamique du courant *induit* et du courant *inducteur* est *répulsive* quand les deux circuits se *rapprochent*, et *attractive* quand ils s'éloignent l'un de l'autre. L'étude de l'action inductrice des aimants sur les circuits métalliques nous fournira bientôt des phénomènes identiques. Tous ces faits peuvent être considérés comme les conséquences directes d'une loi générale établie par M. Lenz (2). Très commode pour prévoir le sens d'un courant *induit* développé dans un circuit métallique par son déplacement en présence d'un appareil *inducteur* quelconque, cette loi est énoncée ainsi qu'il suit par M. Verdet (3) :

« Lorsqu'un courant est induit par le mouvement re-
» latif d'un conducteur et d'un courant ou d'un aimant,
» l'action inductrice tend à développer dans chaque élé-
» ment du conducteur un courant dirigé de telle façon,
» que sa réaction électro-dynamique sur le courant ou

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e sér., 1832, t. L, p. 285 (note).
(2) *Annales de Poggendorff*, nouvelle série, t. XXXI.
(3) *Ann. de chim et de phys.*, 3e sér., 1851, t. XXXI, p. 188 (note).

» sur l'aimant inducteur tend à produire un mouvement » contraire au mouvement réel. »

De la quantité d'électricité mise en mouvement, et de la force électromotrice développée par induction dans un circuit métallique fermé. — L'action inductrice peut être développée soit par un mouvement relatif du circuit voltaïque et du circuit métallique fermé, soit par une variation d'intensité du courant voltaïque inducteur.

a. — *Induction produite par un mouvement relatif du circuit voltaïque et du circuit métallique fermé.* — Tant que ce mouvement relatif dure et conserve le même signe, le circuit métallique reste soumis à une série d'actions inductrices *partielles* qui correspondent aux diverses périodes de ce mouvement, et sont toutes *concordantes* ou de même sens. L'action inductrice *totale* est la *somme* de ces actions inductrices *partielles*. Il en résulte que l'action inductrice *totale*, et la *quantité* d'électricité qui s'écoule à travers le circuit *induit*, augmentent en même temps que l'*étendue* du mouvement relatif. Mais, pour un mouvement relatif de signe et d'étendue déterminés, l'action inductrice *totale*, et la *quantité* d'électricité qui traverse le circuit *induit*, restent *constantes*, et *indépendantes de la vitesse* de ce mouvement. — Il n'en est pas de même de la *force électromotrice* ou de la *tension* développée dans le circuit *induit*. En effet :

La durée de l'action inductrice et de l'écoulement de l'électricité dans le circuit *induit* est la *même* que celle du mouvement relatif des deux circuits. Mais, quelle que soit la vitesse de ce mouvement, c'est toujours une *même*

quantité d'électricité qui traverse le circuit *induit*, entre le moment où le déplacement *commence* et le moment où il *finit*. Dès lors, il est évident que la *tension* sous laquelle circule cette *quantité constante* d'électricité augmente avec la vitesse, et diminue avec la durée du mouvement relatif du circuit *inducteur* et du circuit *induit*.

Il résulte de là que, pour un mouvement relatif de signe et d'étendue déterminés :

1° L'action inductrice *totale*, et la *quantité* d'électricité qui traverse le circuit *induit* pendant la durée du mouvement relatif, restent *indépendantes* de la durée et de la vitesse de ce mouvement.

2° La *force électromotrice* développée dans le circuit *induit* augmente en même temps que la vitesse, et diminue avec la durée du mouvement relatif.

De ces deux principes et de la loi de Lenz il est facile de déduire les conclusions suivantes :

1° Si l'on imprime successivement deux mouvements relatifs de *signes contraires* à un circuit voltaïque et à un circuit métallique fermé, ce dernier circuit est traversé par deux courants *induits* successifs et de *signes contraires*.

2° Si ces deux mouvements relatifs sont de *même étendue*, ce sont des *quantités égales* d'électricité qui traversent, successivement et *en sens contraires*, le circuit métallique fermé pendant que s'effectuent ces mouvements.

3° Pour que les deux *forces électromotrices opposées* successivement développées dans le circuit induit aient la *même intensité*, il ne suffit pas que les deux mouvements soient de *même étendue*, il faut encore qu'ils s'exécutent

avec la même *vitesse*. — Si les mouvements relatifs des deux circuits, quoique de *même étendue*, ne s'exécutent pas en *temps égaux*, la force *électromotrice la plus intense* correspond à celui de ces deux mouvements dont la *vitesse* est *la plus grande*.

b. — Induction produite par une variation d'intensité du courant inducteur. — L'action inductrice commence et finit avec la variation d'intensité du courant inducteur. Pendant toute la durée de cette variation d'intensité, le circuit métallique fermé reste soumis à une série d'actions inductrices *partielles* et *concordantes*, dont la somme est égale à l'action inductrice *totale*. Un raisonnement analogue à celui que nous avons développé à propos du mouvement relatif des deux circuits conduit aux propositions suivantes :

1° L'action inductrice *totale* et la *quantité* d'électricité mise en mouvement dans le circuit *induit* augmentent avec l'*étendue* de la variation d'intensité du courant inducteur.

2° Pour une variation d'intensité du courant inducteur de signe et d'étendue déterminés, la *quantité* d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit est *constante*, et *indépendante* de la *vitesse* de la variation; mais la *force électromotrice* développée dans ce circuit augmente avec la *vitesse* de la variation d'intensité.

3° Si le courant inducteur éprouve deux variations d'intensité successives et de *signes contraires*, le circuit induit est traversé par deux courants successifs et de *sens contraires*. — Si ces deux variations d'intensité du courant inducteur ont la *même étendue*, ce sont des *quan-*

tités égales d'électricité qui traversent, successivement et en *sens contraires*, le circuit induit, pendant que s'effectuent ces variations. — Pour que les deux *forces électromotrices opposées* successivement développées dans le circuit induit soient *égales*, il ne suffit pas que les deux variations d'intensité du courant inducteur aient la *même étendue*, il faut encore qu'elles s'effectuent dans des *temps égaux ;* si ces deux variations d'intensité, quoique de *même étendue*, ont des *durées inégales*, la force *électro-motrice* la *plus intense* correspond à la variation qui s'opère dans le *temps le plus court*.

Spirales à deux fils. — Il n'est pas nécessaire de faire deux spirales distinctes, l'une avec le fil *inducteur*, l'autre avec le fil *induit*. Prenons deux fils métalliques de même longueur; après les avoir recouverts d'une enveloppe isolante de soie, réunissons-les en un *seul* cordon. Si nous enroulons ce cordon autour d'un axe de bois ou de carton, nous aurons une *spirale* B *à deux fils* (Fig. 325), composée de deux circuits métalliques accolés, parallèles et isolés. a, a', sont les extrémités de l'un des fils ; c, c', sont les extrémités de l'autre fil. Si nous faisons communiquer le fil aa' avec les pôles d'une pile, et si nous complétons le circuit du fil cc' avec un galvanomètre, aa' représente le circuit *inducteur*, et cc' le circuit *induit*. Toutes les fois que le circuit voltaïque aa' est *fermé*, un courant induit *inverse* traverse cc'; au moment de la *rupture* du circuit voltaïque aa', un courant induit *direct* se développe dans le fil cc'.

Avantages de la disposition des fils en spirale. — L'expérience démontre que, l'intensité du courant vol-

taïque inducteur et la longueur des circuits restant les mêmes, les courants induits sont *beaucoup plus forts* quand les fils sont enroulés en spirale, que lorsqu'ils sont tendus

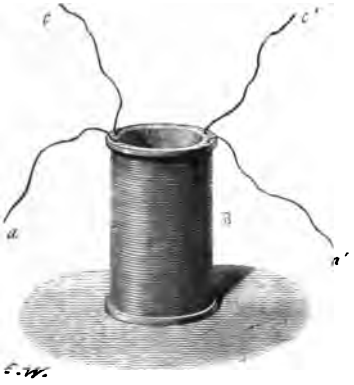


Fig. 325.

en face l'un de l'autre suivant deux lignes droites parallèles. La raison de cette supériorité des spirales sur les circuits rectilignes est facile à comprendre. En effet :

Quelle que soit la forme des deux circuits, chacun des éléments du circuit inducteur n'agit pas seulement sur l'élément le plus voisin du circuit induit, mais sur la totalité du fil qui le compose, et la force électromotrice totale du courant induit est la somme des forces électromotrices concordantes développées par toutes ces actions partielles. D'autre part, l'action d'un élément inducteur sur un élément induit décroît rapidement, à mesure que leur distance augmente. La disposition en spirale, ayant pour résultat évident de maintenir à de *moindres dis-*

tances les diverses portions des deux fils, doit nécessairement favoriser l'action du courant inducteur sur le circuit induit. L'enroulement en spirale n'a donc pas seulement l'avantage de permettre d'employer des fils d'une très grande longueur : il rend plus considérable l'action totale du circuit inducteur sur le circuit induit, et augmente l'intensité de la force électromotrice du courant induit.

Avant de pousser plus loin l'étude des phénomènes d'induction, nous devons nous occuper de la description de quelques appareils d'un emploi très fréquent et très commode. Les uns sont destinés à opérer exclusivement sur le courant inducteur, les autres fonctionnent à la fois dans les deux circuits, l'inducteur et l'induit.

Commutateur. — On donne le nom de *commutateur* à tout appareil destiné à renverser à volonté le sens d'un courant. Nous nous contenterons de décrire (Fig. 326 et 327) celui que M. Ruhmkorff a employé dans sa puissante machine d'induction.

C est un cylindre de verre horizontal porté sur deux équerres métalliques E, E′, au moyen de deux tourillons métalliques *d*, *d*′. Le tourillon *d* se termine par un bouton B, qui sert à imprimer un mouvement de rotation au cylindre. Sur le cylindre C sont appliquées deux épaisses plaques métalliques P, P′, amincies vers les bords, assez étroites pour être complétement isolées et laisser à découvert une grande partie de la surface du cylindre C. La plaque P est fixée au moyen de deux vis, dont une reste noyée dans la masse de verre, tandis que l'autre *b* pénètre dans le tourillon *d*′, et maintient une communication invariable entre cette plaque P, l'équerre E′ et le bouton

métallique A′. La plaque P′ est également fixée par deux vis symétriquement placées ; la plus longue *a* pénètre dans le tourillon métallique *d*, et établit une communication permanente entre la plaque P′, l'équerre E et le bouton métallique A ; l'autre vis reste noyée dans la masse de

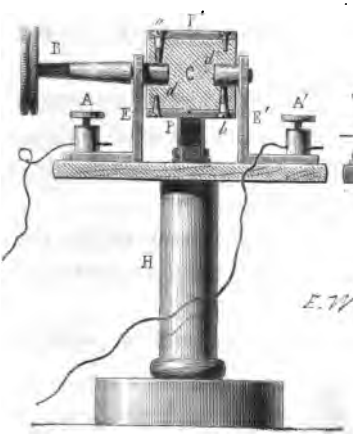


Fig. 326.

Fig. 327.

verre. Deux ressorts métalliques R, R′ (Fig. 327), sont fixés latéralement par des boutons métalliques, et frottent sur deux points opposés de la surface du cylindre.

Faisons communiquer le bouton R avec le pôle positif et le bouton R′ avec le pôle négatif d'une pile ; fixons, en outre, les extrémités du fil d'un galvanomètre aux boutons A, A′. — Dans la position du commutateur indiquée par la Figure 327, les ressorts R, R′, ne touchent pas les plaques métalliques P, P′, le courant ne passe pas. — Au moyen du bouton B, faisons exécuter au cylindre un

quart de révolution, de manière à mettre la plaque P en contact avec le ressort R ; en même temps la plaque P′ touche le ressort opposé R′. Dans ce cas, le circuit est fermé, et l'électricité passe de R à P, de P au tourillon *d′*, à l'équerre E′, au bouton A′ ; le courant marche de A′ en A à travers le fil du galvanomètre, et revient au pôle négatif R′ par l'équerre E, le tourillon *d* et la plaque P′. — Faisons, au contraire, tourner le cylindre de manière à mettre P′ en contact avec le ressort R ; en même temps P touche le ressort opposé R′. Dans ce cas aussi le circuit est fermé, mais le courant est renversé, et marche de A en A′ à travers le fil du galvanomètre.

Dans cet appareil très simple et très commode, le cylindre de verre C est souvent remplacé par un cylindre isolant d'ivoire.

Roue d'interruption. — Cet appareil se compose

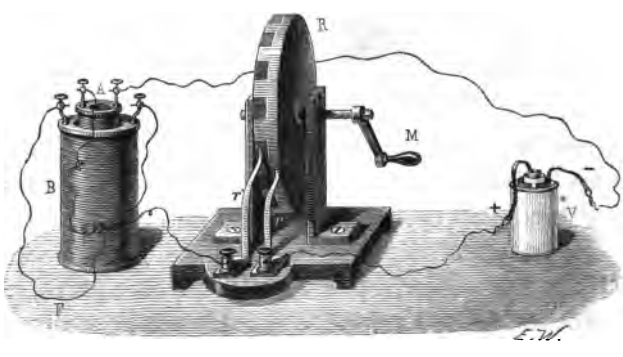


Fig. 328.

(Fig. 328) d'un disque épais R de verre, d'ivoire ou de bois, mis en mouvement à l'aide d'une manivelle M, au-

tour d'un axe métallique qui passe par son centre. Sur le disque est ajusté un anneau de cuivre, dentelé dans une moitié de sa largeur, et sur un côté seulement. Les dents sont égales entre elles et aux espaces qui les séparent. Les espaces placés entre les dents sont remplis par la matière isolante du disque lui-même. Un ressort métallique r porte sur la partie continue de l'anneau, un second ressort métallique r' correspond à sa partie dentelée. Quand le disque est en rotation, le ressort r est *constamment* en contact avec l'anneau métallique; le ressort r', au contraire, touche alternativement les dents métalliques de l'anneau et la matière isolante qui les sépare. Cet appareil est souvent désigné sous le nom de *rhéotome simple*.

Soit A une spirale communiquant par une extrémité au ressort r', et par l'autre extrémité au pôle négatif d'un couple V. Faisons, en outre, communiquer le pôle positif du couple V au ressort r, complétons le circuit d'une seconde spirale B au moyen du fil métallique F, et mettons la roue R en mouvement. Toutes les fois que le ressort r' touche une dent métallique, le circuit voltaïque est fermé, le courant passe; toutes les fois, au contraire, que le ressort r' est en contact avec la matière isolante qui sépare les dents de l'anneau, le circuit est rompu et le courant ne passe plus. La spirale A joue donc le rôle de spirale *inductrice*, par rapport à la spirale B dans laquelle elle est placée. Tant que dure le mouvement de rotation du disque R, le circuit fermé de la spirale B est traversé par une série de courants *induits directs et inverses*, qui se succèdent d'autant plus vite que le mouvement du disque R est lui-même plus rapide.

Roue à séparation des courants d'induction. — Sur un même axe (Fig. 329), on monte deux disques R, R′, semblables au précédent. Au disque R correspondent deux ressorts r, r', et au disque R′ une seconde paire de ressorts l, l'. Chaque paire de ressorts est, d'ailleurs, disposée comme dans la *roue d'interruption* de la Figure 328. Le circuit du couple V est complété par la spirale *inductrice* A et les ressorts r, r' du disque R ; le circuit de la spirale *induite* B est complété par le galvanomètre G et les ressorts l, l' du disque R′. Les deux disques R, R′, tournent ensemble autour de leur axe commun.

Si, comme l'indique la Figure 329, les dents métalliques du disque R′ correspondent à celles du disque R, les deux

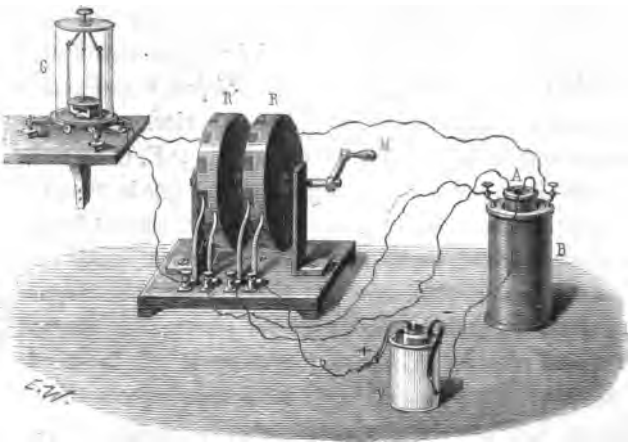


Fig. 329.

circuits sont *fermés* et *rompus* en même temps. Dans ce cas, évidemment, le courant *induit inverse* peut *seul* circuler et influencer le galvanomètre.

Si, au contraire, les dents métalliques du disque R' alternent avec celles du disque R, le circuit de la spirale *induite* B est *interrompu* toutes les fois que celui de la spirale *inductrice* A est *fermé;* par suite, le circuit de la spirale *induite* B est *fermé* toutes les fois que celui de a spirale *inductrice* A est *rompu.* Il en résulte nécessairement que le courant *induit direct*, ou de *rupture*, peut *seul* circuler et influencer le galvanomètre.

D'ailleurs, la disposition de l'appareil permet de donner à volonté au disque R' l'une ou l'autre de ces deux positions, par rapport au disque R. On peut donc aussi à volonté recueillir, *seulement*, ou le courant induit *direct*, ou le courant induit *inverse.*

Rhéotrope. — MM. Masson et Breguet (1) ont donné ce nom à un assemblage de disques semblables à la roue d'interruption. Ils ont employé cet appareil pour recueillir à la fois le courant *induit inverse* et le courant *induit direct*, et pour les faire passer tous les deux dans le même sens à travers un galvanomètre.

Le disque 1 (Fig. 330) est une simple roue d'interruption qui, avec la spirale *inductrice* A, complète le circuit du couple V. Dans les disques 3 et 4, les contacts des ressorts et des dents métalliques se *correspondent;* dans les disques 2 et 5, les contacts des ressorts et des dents métalliques se *correspondent* aussi, mais *alternent* avec ceux des disques 3 et 4.

La spirale induite B communique, par ses extrémités, avec deux tringles métalliques isolées P, P'. De la tringle P

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 133.

partent deux ressorts métalliques r, l, qui vont aux parties continues des anneaux métalliques des disques 3 et 5; de la tringle P' partent deux ressorts semblables r', l', qui appuient sur les parties continues des anneaux métalliques des disques 2 et 4.

De la plaque métallique R partent deux ressorts d, e, qui vont aux dents des anneaux métalliques des disques 4 et 5 ; de la plaque métallique R' partent deux ressorts

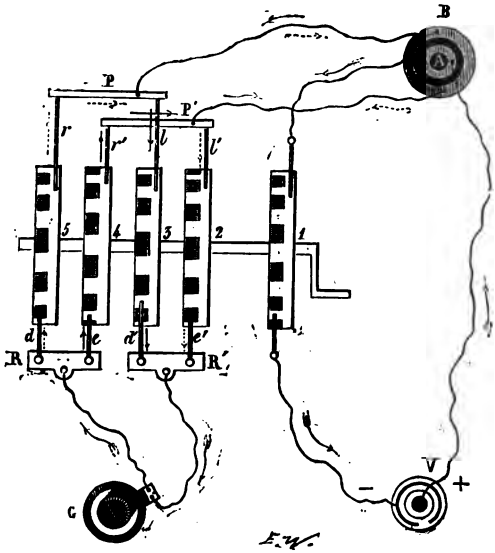


Fig. 330.

semblables d', e', qui vont aux dents des anneaux métalliques des disques 2 et 3.

Enfin, les plaques métalliques R, R', communiquent avec les extrémités du fil d'un galvanomètre G.

La Figure 330 représente le temps de la rotation du système correspondant au moment où le circuit du couple V et de la spirale *inductrice* A est fermé. — Dans ce cas, il sort de la spirale induite B, dans le sens des flèches *supérieures* et indiquées en *lignes pleines*, un courant *induit inverse* qui gagne P, passe par *l*, par l'anneau du disque 3, par *d'*, par R', traverse le galvanomètre G de R' en R, revient par *e*, par l'anneau métallique du disque 4, par *r'*, par P', et rentre dans la spirale *induite* B.

Déplaçons le système tout entier de manière à interrompre le circuit de la pile et de la spirale *inductrice* A; les contacts des ressorts des plaques R, R', avec les portions dentelées des anneaux des disques 2, 3, 4, 5, sont complétement intervertis. — Dans ce cas, il sort de la spirale *induite* B, dans le sens des flèches *inférieures* et indiquées en *lignes ponctuées*, un courant *induit direct* qui gagne P', passe par *l'*, par l'anneau du disque 2, par *e'*, par R', traverse le galvanomètre G de R' en R, revient par R, par *d*, par l'anneau métallique du disque 5, par *r*, par P, et rentre enfin dans la spirale *induite* B.

Avec cette disposition, les courants *induits*, *direct* et *inverse*, traversent *tous les deux* le système, mais ils sont dirigés de manière à avoir *le même sens* dans le circuit du galvanomètre G, et à dévier l'aiguille aimantée du même côté.

Propriétés des courants induits. — Les courants induits jouissent des mêmes propriétés, et produisent les mêmes effets physiques et chimiques que les courants voltaïques. La roue à séparation des courants (Fig. 331) est très commode pour le démontrer. Après avoir placé

cet appareil dans les circuits de la pile, de la spirale *inductrice* et de la bobine *induite*, il est facile de faire les expériences suivantes :

1° Dans le circuit de la bobine induite, plaçons un galvanomètre ; un seul des deux courants *induits* traverse

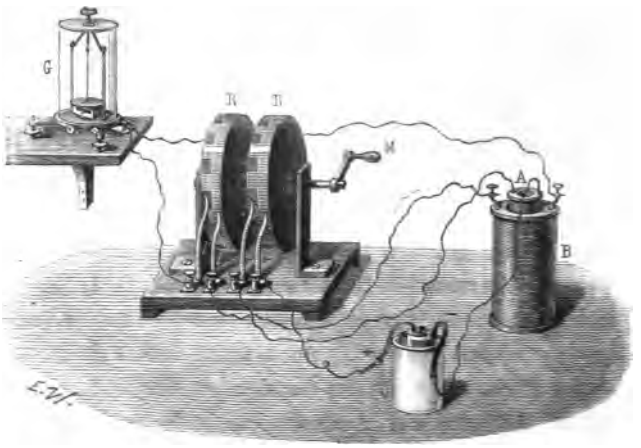


Fig. 351.

le système. L'aiguille aimantée est toujours déviée, et le sens de la déviation est toujours d'accord avec celui du courant *induit* recueilli. Par conséquent, le côté vers lequel l'aiguille aimantée est repoussée change avec le sens du courant *induit* auquel l'appareil livre passage.

2° Dans le circuit de la bobine induite, plaçons une petite spirale contenant une aiguille d'acier trempé. Quand le système entre en mouvement, l'aiguille s'aimante, et le sens de l'aimantation acquise est toujours d'accord avec celui du courant *induit* qui traverse la petite spirale.

3° Quand le circuit de la bobine induite est complété par

un fil *très fin* de platine, si le mouvement de rotation du rhéotome est rapide, le fil s'échauffe et *rougit*.

4° Nous verrons plus tard que les courants *induits* exercent aussi une action *inductrice* sur les circuits métalliques voisins.

5° Enfin, complétons le circuit de la spirale induite avec un voltamètre à eau acidulée. — L'eau est décomposée, et, l'appareil n'étant traversé que par *un seul* des deux courants *induits*, l'une des cloches ne contient que de l'oxygène et l'autre que de l'hydrogène. Ajoutons seulement que la position des *pôles* du voltamètre se renverse avec le sens du courant *induit* recueilli.

Tension électrique des extrémités des circuits soumis à l'induction. — MM. Masson et Breguet (1) ont étudié avec soin la tension électrique des extrémités d'une forte bobine soumise à l'induction. La spirale *inductrice* fermait le circuit d'une pile voltaïque, et l'appareil était disposé de manière à agir seulement sur le courant induit *direct*, c'est-à-dire sur celui qui se développe au moment de la *rupture* du circuit inducteur. Une des extrémités de la bobine induite était en *contact permanent* avec le plateau inférieur d'un condensateur, et l'autre était maintenue en présence et à faible distance du plateau supérieur. A chaque *rupture* du circuit inducteur, une *vive étincelle* éclatait, à travers l'air interposé, entre l'extrémité libre du circuit induit et le plateau correspondant; le condensateur prenait une *forte charge*.

MM. Masson et Breguet trouvèrent que le courant in-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 146.

duit *inverse* peut aussi communiquer une charge au condensateur, mais n'a pas assez de *tension* pour donner une étincelle à l'air libre.

D'ailleurs, qu'on agisse avec le courant *inverse* ou avec le courant *direct*, la distribution des deux électricités sur les plateaux du condensateur est parfaitement d'accord avec le sens du courant *induit* employé.

Il résulte de ces observations que la génération des courants *induits* peut et doit être assimilée à celle des courants voltaïques. — Au moment où il *commence* comme au moment où il *finit*, le courant inducteur développe, dans un conducteur voisin, une force électromotrice traduite et mesurée par la différence algébrique des tensions *opposées* des extrémités de ce conducteur. — Quand le circuit *induit* est *fermé*, cette force électromotrice détermine la circulation de courants induits dont le sens dépend du sens de la force elle-même. Ces courants induits sont *instantanés* et alternativement de *sens inverses*, parce que la force électromotrice développée au *commencement* du courant inducteur est *directement opposée* à celle qui correspond à son *interruption*, et que, dans le premier comme dans le second cas, la force électromotrice d'induction n'a elle-même qu'une durée *excessivement courte*.

Les expériences de MM. Masson et Breguet prouvent, en outre, que la différence algébrique des tensions opposées des extrémités du circuit induit est plus considérable au moment où le courant inducteur *finit* qu'au moment où il *commence*. Elles montrent, en effet, que la *tension* du courant induit *direct* l'emporte sur celle du courant induit *inverse*.

Action inductrice d'un courant voltaïque sur son propre circuit. — MM Masson, Pouillet, Nobili, Jenkin, etc., avaient constaté que l'introduction d'une forte spirale dans le circuit d'une pile suffit pour augmenter considérablement l'intensité de l'étincelle à la *rupture*. M. Faraday a postérieurement analysé ce phénomène; il a prouvé (1) que ce renforcement de l'étincelle de *rupture* est dû à une action inductrice du courant voltaïque sur le fil qui lui sert de conducteur.

Lorsque les deux extrémités d'un circuit voltaïque plongent dans le mercure, il est facile de constater les faits suivants. — Si le circuit est fermé par un fil rectiligne *court*, on obtient, à la *rupture*, une *faible* étincelle. — L'étincelle à la *rupture* devient plus brillante quand la pile est fermée par un fil rectiligne *très long;* l'introduction d'une *forte bobine* dans le circuit voltaïque donne encore plus d'éclat à l'étincelle. — Cependant l'intensité du courant voltaïque diminue à mesure que le circuit s'allonge; par conséquent, l'étincelle à la *rupture* devrait s'affaiblir dans les mêmes proportions, si un phénomène nouveau n'intervenait pas.

Pour expliquer cette influence de l'introduction d'un fil rectiligne *très long* et surtout des fortes bobines dans le circuit de la pile, on admet que le courant exerce une action inductrice sur son propre conducteur, tant au moment où le circuit est *fermé* qu'au moment où il est *rompu*.

Au moment de la rupture, l'induction développe dans le circuit une *force électromotrice directe*, ou de même sens que

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 322.

celle du courant inducteur. Cette force *électromotrice directe* donne naissance à un courant *induit direct* qui s'ajoute au courant *inducteur*, le prolonge et augmente l'intensité de l'étincelle de rupture : c'est l'*extra-courant direct*.

Le courant, au moment où il est fermé, exerce aussi une action inductrice sur son propre circuit. Mais la *force électromotrice d'induction* développée dans ce cas est *inverse*, ou opposée à celle du courant *inducteur*. Cette force *électromotrice inverse* ne donne pas réellement naissance à un courant, mais elle se conduit comme une *résistance nouvelle* introduite dans le circuit ; son action se borne donc à diminuer *momentanément* l'intensité du courant inducteur. On appelle *extra-courant inverse* le courant *induit* que cette force électromotrice tend à développer dans le circuit du courant inducteur.

1° **Extra-courant direct ou de rupture.** — L'existence de l'extra-courant direct est facile à démontrer. En effet, soit V (Fig. 332) une pile hydro-électrique, dont le circuit *abefcd* contient, en *ef*, une forte spirale A. Entre le point *c* et le point *b* plaçons une petite spirale *s* composée d'un fil très fin de platine. Le courant voltaïque traverse le circuit entier *abefcd*, et fournit, en *b*, un courant de *dérivation* qui parcourt le trajet *bscd*.

Si la spirale *s* est formée avec un fil de platine *très fin* et, par suite, *très résistant*, le courant de *dérivation* est assez faible pour ne pas aimanter sensiblement une aiguille d'acier trempé placée dans cette spirale. On s'assure du fait, en introduisant l'aiguille d'acier dans la spirale *s* après avoir *fermé* le circuit, et en la retirant avant sa *rupture*,

Cela posé, le circuit étant fermé et l'aiguille d'acier placée dans la spirale *s*, *interrompons* le circuit en *a* ou en *d*. Nous trouvons alors que l'aiguille est aimantée, et

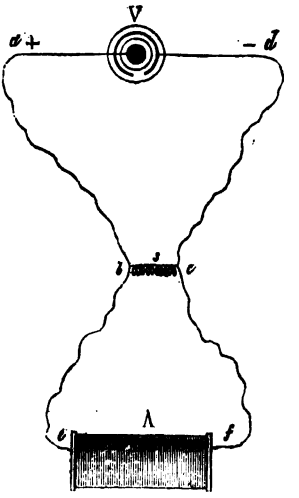


Fig. 332.

que le sens de l'aimantation communiquée accuse le passage d'un courant dirigé de *c* en *b*, à travers la spirale *s*. Ce courant d'*induction* produit par la *rupture* du circuit a donc traversé la petite spirale *s* dans un sens *contraire* à celui du courant voltaïque *dérivé*, mais il a parcouru la portion *befc* du circuit total dans le *même sens* que le courant voltaïque *inducteur;* c'est donc un courant *induit direct* développé, au moment de la *rupture* du circuit, dans le conducteur du courant voltaïque, ou un *extra-courant direct*. — Quand la *rupture* du circuit est

pratiquée entre *b* et *e* ou entre *c* et *f*, le courant de l'électromoteur V passe *tout entier* par la spirale *s* et la traverse de *b* en *c*; le courant d'*induction*, au contraire, ne peut pas s'établir, parce qu'il n'existe plus de communication entre les extrémités *e*, *f*, de la grande spirale induite A. Dans ce cas, l'aimantation de l'aiguille est due au courant de la pile V, et accuse un courant qui traverse *s* de *b* en *c*.

Remplaçons, en *s*, la petite spirale par deux fils de cuivre gros et courts. Ces deux fils additionnels sont soudés l'un en *b*, l'autre en *c*, et se touchent par leurs extrémités libres. Au moment de la *rupture* du circuit en *a* ou en *d*, si les deux fils additionnels continuent à se toucher, l'*extra-courant* passe tout entier par dérivation de *c* en *b*, et il n'y a qu'une *très faible* étincelle au point de rupture du circuit. Mais, si les deux fils additionnels sont séparés au moment où le circuit est *rompu* en *a* ou en *d*, on voit apparaître, dans l'espace *bc*, et entre les bouts séparés des fils additionnels, une *très brillante* étincelle qui accuse le passage de l'*extra-courant direct* développé dans la grosse spirale A.

Remplaçons, en *s*, la petite spirale par un galvanomètre. Tant que le circuit reste fermé, l'aiguille aimantée est déviée par un courant *dérivé* dirigé de *b* en *c*. Laissant le circuit fermé, ramenons l'aiguille à *zéro*, et assujettissons-la dans cette position au moyen de deux petites goupilles placées contre ses extrémités. Ces goupilles l'empêchent d'obéir à l'action du courant *dérivé* dirigé de *b* en *c*, mais lui permettent de se mouvoir en sens inverse. —Au moment de la rupture du circuit en *a* ou en *d*, l'aiguille aimantée est déviée, et accuse le passage d'un cou-

rant *instantané* dirigé de *c* en *b*, à travers le circuit du galvanomètre.

Remplaçons enfin la petite spirale *s* par un voltamètre à eau. Si la pile V est faible, le courant, à cause de la grande conductibilité du fil métallique, passe *tout entier* à travers la spirale A et ne fournit pas de courant *dérivé* appréciable de *b* en *c*; par conséquent, tant que le circuit reste fermé, il n'y a pas trace de décomposition dans le voltamètre.

Cela posé, plaçons une roue d'interruption entre *b* et *e* ou entre *c* et *f*, et mettons cette roue en mouvement. Toutes les fois que le circuit est fermé, le courant voltaïque passe tout entier par la spirale A; mais, quand le circuit est interrompu, la totalité du courant voltaïque passe nécessairement de *b* en *c*, à travers le voltamètre. Quant à l'*extra-courant direct* correspondant à la rupture du circuit, ce courant *induit* ne peut pas s'établir dans cette position de la roue, car, au moment où il prend naissance, il n'y a plus de communication entre les extrémités *e* et *f* de la grande spirale induite A. Quand la roue a marché pendant un certain temps, on trouve de l'oxygène et de l'hydrogène séparés et parfaitement purs dans les cloches du voltamètre; de plus, ces gaz, par leur position relative, indiquent que le voltamètre a été traversé par un courant dirigé de *b* en *c*, c'est-à-dire par le courant de la pile V elle-même.

Plaçons maintenant la roue d'interruption entre *a* et *b* ou entre *d* et *c*. Toutes les fois que le circuit est fermé, le courant voltaïque traverse tout entier la spirale A; quand au contraire le circuit est rompu, le courant voltaïque est

complétement arrêté, mais l'*extra-courant direct* développé en A peut circuler, à travers le voltamètre, de *c* en *b*. Quand la roue a marché pendant un certain temps, on trouve, comme dans le cas précédent, de l'oxygène et de l'hydrogène séparés et parfaitement purs dans les cloches du voltamètre; mais cette fois les gaz, par leur position relative, indiquent que le voltamètre a été traversé par une série de courants tous dirigés de *c* en *b*, c'est-à-dire dans le sens de l'*extra-courant direct* ou de *rupture*.

Ces expériences démontrent d'une manière évidente qu'au moment de la *rupture* d'un circuit voltaïque, le courant agit par induction sur le fil métallique qui lui sert de conducteur, et développe ainsi un *extra-courant direct* qui, *s'ajoutant* au courant voltaïque *inducteur*, augmente l'intensité de l'étincelle échangée par les extrémités du fil rompu.

2° **Extra-courant inverse.** — L'action inductrice d'un courant voltaïque sur son propre circuit, au moment où ce circuit est fermé, est plus difficile à démontrer.

Cette action inductrice, en effet, s'exerce au moment même où le courant voltaïque commence à circuler; il en résulte qu'elle ne développe pas dans le circuit un véritable mouvement électrique, mais une simple force électromotrice *inverse*, qui joue le rôle d'une *résistance active* nouvelle placée dans le circuit, et détermine un affaiblissement *momentané* de l'intensité du courant inducteur. Dans ce cas, tout se réduit donc à une action *négative*, dont il est cependant possible de mettre les effets en évidence.

Remplaçons (Fig. 333) la spirale *s* par un galvanomètre dont le fil communique par une extrémité avec *b*

et par l'autre avec *c*. Le circuit étant fermé, l'aiguille est déviée par un courant *dérivé* dirigé de *b* en *c*, et dont l'intensité augmente en même temps que la *résistance* de la portion *befc* du circuit total. Latéralement et aux extrémités de l'aiguille aimantée, plaçons deux goupilles qui la maintiennent dans la position de déviation angulaire

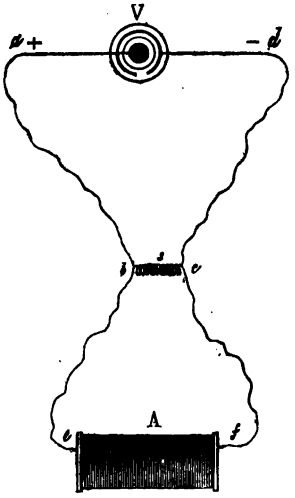


Fig. 333.

que lui imprime ce courant *dérivé*, et l'empêchent de rétrograder vers le *zéro* quand le circuit est rompu. — Cela posé rompons le circuit en *a*; l'aiguille reste dans sa position de déviation, puisqu'elle ne peut obéir ni à l'action de la terre qui la sollicite vers le *zéro*, ni à l'action de l'extra-courant direct qui, passant de *c* en *b*, tend à lui imprimer une déviation opposée à celle qu'elle

prend sous l'influence du courant voltaïque *dérivé* dirigé de *b* en *c*. — Rétablissons les communications en *a*. Au moment où le circuit est fermé, l'aiguille reçoit une impulsion qui l'éloigne des goupilles contre lesquelles elle appuyait, et augmente sa déviation; cette impulsion est d'ailleurs *instantanée*, et l'aiguille reprend très rapidement sa déviation primitive. —Ainsi donc, au moment où le circuit est fermé, le courant *dérivé* dirigé de *b* en *c* prend une intensité supérieure à celle qu'il aura plus tard et pendant tout le temps que le circuit restera complet. Par conséquent, au moment où le circuit est fermé, il se développe dans le conducteur *befc*, ou dans la spirale A, une *résistance* dont la durée est *très courte*. Cette *résistance nouvelle* et *momentanée* traduit évidemment le développement d'une force *électromotrice inverse* dans la spirale A, au moment où le circuit de la pile est fermé.

Mettons un voltamètre à eau en place de la petite spirale *s* de la Figure 333. Nous pouvons prendre une pile V assez forte pour que, le circuit étant fermé, un courant *dérivé continu* passe de *b* en *c*, et détermine une faible décomposition du liquide. Laissons le circuit fermé pendant un temps *déterminé*, et mesurons l'action électrolytique de ce courant voltaïque *dérivé continu*. — Cela fait, disposons l'appareil de manière que le circuit puisse *être rompu à la fois* entre le point *a* et le point *b*, et entre le point *c* et le point *f*. Quand le circuit est rompu en ces deux points, le courant voltaïque et l'*extra-courant direct* ne peuvent circuler ni l'un ni l'autre, et rien ne passe à travers le voltamètre. Quand au contraire le circuit est fermé en ces deux points, un courant *dérivé* se rétablit de *b* en *c*, et

décompose le liquide du voltamètre. — Si ces interruptions sont *rapides*, le courant *dérivé intermittent* dirigé de *b* en *c* produit, dans un temps *donné*, un effet électrolytique supérieur à celui du courant *dérivé continu* de même sens établi à travers le voltamètre pendant que le circuit est fermé d'une manière permanente. Cette supériorité du courant *dérivé intermittent* sur le courant *dérivé continu* prouve que, au moment où le circuit est fermé, il se développe, dans la spirale A, une force *électromotrice inverse* qui, pendant un temps *très court*, oppose une *nouvelle résistance* au courant voltaïque.

Ce résultat s'accorde avec celui de l'expérience précédente pour démontrer qu'au moment où le conducteur interpolaire d'une pile est fermé, le courant développe par induction, dans son propre circuit, une force électromotrice *inverse* dont l'effet est de diminuer, pendant un temps *très court*, l'intensité du courant voltaïque qui commence.

Les propositions suivantes ne sont donc que l'expression sommaire des faits établis, d'une manière incontestable, par les beaux travaux de M. Faraday.

1° Au moment où il *commence* et au moment où il *finit*, le courant voltaïque agit par *induction* sur son propre circuit, et développe dans ce circuit deux forces électromotrices, l'une *inverse* au moment où le circuit est fermé, et l'autre *directe* au moment de la rupture de ce circuit.

2° Le courant, au moment où il *commence*, ne développe pas réellement un *extra-courant*, mais une simple force électromotrice *inverse* dont l'effet est de diminuer, instantanément et pendant un temps *très court*, l'intensité du courant voltaïque *inducteur*.

3° La force électromotrice *directe* produite par le courant qui *finit* détermine le développement d'un *extra-courant direct*, qui s'ajoute au courant voltaïque *inducteur*, le prolonge, et augmente l'intensité de l'étincelle de *rupture*.

D'ailleurs, ces deux forces électromotrices prennent naissance dans un *même* circuit, au moment de l'*établissement* et au moment de l'*interruption* d'un *même* courant; elles correspondent donc à une *même somme* d'actions inductrices développées par le courant voltaïque dans son propre circuit. Il en résulte que, sous l'influence de ces deux forces électromotrices, une *même quantité* d'électricité serait mise en mouvement, alternativement et en sens inverses, dans le circuit du courant inducteur. Mais la *durée* de l'action inductrice exercée au moment de la rupture est limitée par celle de l'étincelle qui prolonge le courant inducteur; elle est nécessairement *plus courte* que la *durée* de l'action inductrice développée dans le circuit fermé, au moment où le courant commence. Pour mettre une *même quantité* d'électricité en mouvement dans le *même* circuit, il faudrait donc à la force électromotrice *inverse* un temps *plus long* qu'à la force électromotrice *directe :* par conséquent, l'*intensité* de la force électromotrice *inverse* est *plus faible* que celle de la force électromotrice *directe*. Si les deux *extra-courants* de sens opposés se développaient librement, ils mettraient successivement en mouvement des *quantités égales* d'électricité dans le circuit voltaïque; mais l'*extra-courant direct*, comme ayant une *moindre durée*, aurait nécessairement une *tension supérieure* à celle de l'*extra-courant inverse*.

De ce que nous dirons, page 202 et suivantes, des pro-

priétés inductrices des aimants permanents et temporaires, il résulte que, par l'introduction d'un barreau de fer doux dans la spirale A, on augmente considérablement l'intensité de ces deux forces électromotrices d'induction.

Comparaison des deux courants induits inverse et direct fournis par une même bobine. — Soient : B une spirale induite (Fig. 334) dont le circuit est fermé par le fil métallique F, et A une spirale inductrice dans le circuit de laquelle est introduite une roue d'interruption R.

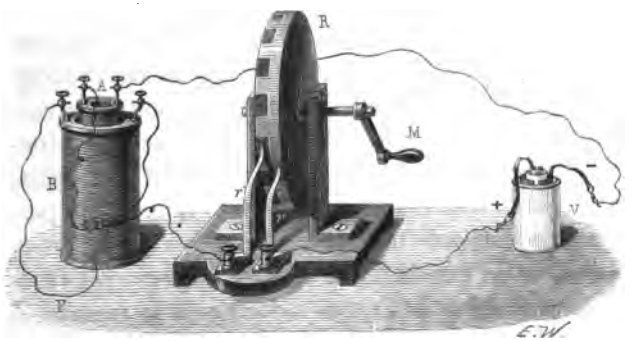


Fig. 334.

Quand la roue R est en mouvement, la spirale induite B est traversée par une série de courants *induits*, alternativement *inverses* et *directs;* mais, en même temps, il se développe dans la spirale inductrice A deux forces électromotrices, l'une *inverse* et l'autre *directe*. Ces deux forces électromotrices prolongent la *durée* des actions inductrices exercées par la spirale A, au moment où son circuit est fermé et au moment où il est rompu ; mais la *somme* de ces actions inductrices supportées par la spi-

rale B, soit à l'établissement, soit à l'interruption du courant voltaïque, reste la *même*. En effet :

L'*extra-courant direct* se manifeste au moment de l'interruption du courant voltaïque *inducteur* dont, sous forme d'étincelle, il prolonge la durée. L'action inductrice du *commencement* de cet *extra-courant* est *opposée* à celle de l'interruption du courant voltaïque, et tend à en *diminuer* l'intensité; l'action inductrice de la *fin* de cet *extra-courant* est de *même sens* que celle de l'interruption du courant voltaïque, et tend à en *augmenter* l'intensité. Comme, d'ailleurs, ces deux actions inductrices du commencement et de la fin de l'*extra-courant* déterminent, dans la spirale induite, des mouvements électriques *contraires* et *égaux en quantité*, la *somme* des actions inductrices subies par la spirale B, et la *quantité* d'électricité du courant *direct* développé dans cette spirale, à la *rupture* du circuit inducteur, restent les *mêmes* que si l'*extra-courant direct* n'existait pas. Mais cet *extra-courant direct prolonge* la *durée* de l'action inductrice à la rupture; il *diminue* donc la *tension*, et, par suite, l'*intensité* du courant induit *direct* développé dans la spirale B, au moment de l'interruption du courant voltaïque inducteur.

Quant à la force électromotrice correspondante à l'*extra-courant inverse*, nous savons qu'elle ne révèle son existence que par un affaiblissement du courant voltaïque dans les premiers instants de l'établissement du circuit. L'intensité du courant voltaïque de la spirale A, au lieu d'atteindre son *maximum* au moment même où le circuit est fermé, passe donc par une période d'accroissement dont la durée est la même que celle de l'action de cette

force électromotrice. Dès lors, la *somme* des actions inductrices de A sur B reste toujours la même ; mais la *durée* de ces actions inductrices est nécessairement prolongée. La *quantité* d'électricité mise en mouvement dans la spirale B par le courant *induit inverse* n'est donc pas diminuée, mais la *tension*, et, par suite, l'*intensité* de ce courant *inverse* est affaiblie.

Si la *durée d'action* des forces électromotrices des deux *extra-courants* était la même, les courants induits *inverse* et *direct*, développés dans la spirale B au moment où le circuit voltaïque est *fermé* et au moment où il est *rompu*, auraient nécessairement la *même intensité*. Mais nous avons vu, page 194, que la *durée d'action* de la force électromotrice de l'*extra-courant direct* est *plus courte* que celle de la force électromotrice *inverse*. Par conséquent, les deux courants induits et *opposés* successivement développés dans la spirale B, quoique *égaux en quantité*, n'ont pas la même *intensité ;* le courant *induit direct*, en effet, comme correspondant à l'action inductrice la *moins prolongée*, doit avoir une *tension plus considérable*. Les observations de MM. Masson et Breguet (page 183) démontrent l'exactitude de cette dernière conclusion. La supériorité du courant *direct* sur le courant *inverse* rend compte des phénomènes produits par le passage des deux courants *induits*, à travers les conducteurs divers qu'on peut employer pour fermer le circuit de la spirale induite B.

1° En place du fil F de la Figure 334, introduisons un galvanomètre à fil *gros* et *court* dans le circuit de la bobine induite B. Les effets varient avec la vitesse de rotation de la roue d'interruption R. — Si le mouvement est

lent, l'aiguille aimantée est alternativement déviée à droite et à gauche par les courants induits, *inverse* et *direct*, qui se succèdent. — Mais, si la roue tourne *très vite*, l'aiguille aimantée, malgré le passage des courants alternatifs de *sens opposés*, reste *immobile* sur le *zéro* de la graduation.

Ce dernier résultat s'explique facilement. En effet, d'une part, nous savons que les courants *induits directs* et *inverses* sont *égaux en quantité*.—D'autre part, la *durée* d'un courant induit est toujours *extrêmement petite* par rapport à celle d'une oscillation de l'aiguille du galvanomètre. Quand donc la roue d'interruption tourne très vite, avant que l'aiguille aimantée ait eu le temps de se déplacer, le circuit du galvanomètre est traversé par deux flux alternatifs d'électricité *égaux en quantité* et de *sens inverses*. Comme, d'ailleurs, la résistance du circuit du galvanomètre à fil *gros* et *court* est *négligeable* par rapport à celle de la bobine, ces deux actions opposées sont égales et se neutralisent; dès lors, l'aiguille aimantée reste en équilibre et immobile sur le *zéro* de la graduation.

Cependant, quand on emploie un galvanomètre à fil *très fin* et *très long*, la résistance de son circuit n'est plus *négligeable* par rapport à celle de la bobine induite, et les phénomènes changent. Dans ce cas, l'*intensité*, déjà *moindre*, du courant induit *inverse* est beaucoup plus *affaiblie* par la résistance du galvanomètre que l'*intensité* du courant *direct*, et les deux actions *contraires* exercées sur l'aiguille aimantée ne conservent pas la *même valeur;* l'aiguille est alors entraînée du côté correspondant au sens du courant le plus *fort*, c'est-à-dire par l'action du courant *direct*,

Cela posé, pratiquons une *interruption* dans le circuit du galvanomètre, et rapprochons les extrémités du fil rompu. Les courants induits ne peuvent circuler qu'à la condition de traverser, sous forme d'étincelles, la couche d'air qui sépare les extrémités du fil. Dans ce cas, la déviation de l'aiguille aimantée prouve qu'un *seul* courant passe; c'est le courant *direct*. Ce résultat tient évidemment à ce que le courant *direct* l'emporte en *tension* sur le courant *inverse*, bien qu'il lui soit égal en *quantité*.

Toutes les fois donc que la résistance du circuit additionnel placé entre les extrémités de la bobine induite est *négligeable* par rapport à celle de cette bobine, les deux courants induits exercent la *même* influence sur l'aiguille aimantée. —Quand, au contraire, la résistance du circuit additionnel n'est pas *négligeable* par rapport à celle de la bobine induite, l'action du courant *direct* l'emporte sur celle du courant *inverse;* et, si la résistance du circuit additionnel est *très grande*, le courant *direct* passe *seul*.

2° En place du fil F de la Figure 334, introduisons une *petite spirale supplémentaire* dans le circuit de la bobine induite B, et déposons une aiguille d'acier trempé dans cette petite spirale supplémentaire. —Quand la roue d'interruption R a marché pendant un certain temps, l'expérience prouve que l'aiguille d'acier trempé est aimantée, et que le *sens* de l'aimantation acquise correspond à celui du courant *direct*. La force coercitive de l'acier trempé représente une *résistance* qu'il faut vaincre, pour communiquer une aimantation permanente à l'aiguille placée dans la spirale supplémentaire. Dès lors, il est tout simple que la *résultante* des actions contraires de ces deux cou-

rants induits ait le signe de celui des deux courants dont la *tension* est la plus grande, c'est-à-dire du courant *direct*.

3° Enfin, remplaçons le fil F de la Figure 334 par un voltamètre à eau acidulée. Quand les appareils d'induction sont puissants, les deux courants induits ont assez de *tension* pour traverser l'électrolyte. Dans ce cas, pendant que la roue d'interruption R est en mouvement, le liquide est traversé par une série de courants induits alternatifs et de sens inverses. Chacune des cloches du voltamètre contient de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour reproduire l'eau. Ce résultat démontre que les deux courants induits ont la même puissance électrolytique. Il devait en être ainsi, puisque les deux courants induits sont égaux *en quantité*, et puisqu'une *même quantité* d'électricité transmise décompose toujours une *même quantité* d'eau. L'expérience démontre, d'ailleurs, que l'activité de la décomposition de l'électrolyte est proportionnelle à la vitesse de la roue d'interruption, ou au nombre des courants induits qui, dans un temps donné, traversent le liquide.

Conformément à la belle observation de M. de La Rive, les mélanges détonants recueillis dans les éprouvettes du voltamètre se combinent en partie sous l'influence des électrodes de platine, et le volume des gaz obtenus ne représente jamais la totalité de l'effet électrolytique. Dans ces derniers temps (1), M. Masson a montré que l'étenduc de la surface des électrodes de platine exerce une grande

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1856, t. XLIII, p. 1115.

influence sur l'intensité de cet effet secondaire de recomposition des gaz. D'après ses expériences, quand les fils de platine ont quelques dixièmes de millimètre de diamètre, les gaz se recombinent en *totalité*, et l'on n'obtient aucune trace apparente de décomposition; quand, au contraire, on prend pour électrodes des fils de platine *très fins*, scellés dans des tubes de verre et dont la saillie ne dépasse pas *un* à *deux* millimètres, la recomposition est *très faible*, et les gaz se dégagent en abondance dans les cloches du voltamètre. L'intensité de la recomposition dépendant de l'étendue de la surface immergée de l'électrode, on comprend pourquoi, généralement, les mélanges gazeux n'ont pas le même volume dans les deux cloches. Mais, malgré ces recompositions partielles et d'inégale intensité, chaque cloche du voltamètre contient *toujours* de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour reproduire de l'eau; ce fait est important, et suffit pour démontrer l'égalité d'action électrolytique du courant *induit inverse* et du courant *induit direct*.

M. Matteucci a, par une expérience très ingénieuse, mis hors de doute cette égalité de puissance électrolytique des deux courants induits. Il a remplacé le voltamètre à eau par une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Dans ce cas, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue d'interruption, on n'obtient aucune trace sensible d'électrolysation, bien que chacun des courants induits, dirigé séparément à travers le liquide, soit capable de précipiter le cuivre. Quand les deux courants induits passent, chaque électrode joue alternativement le rôle de pôle positif et de pôle négatif, et, par suite, reçoit successivement

un équivalent de cuivre, un équivalent d'oxygène et un équivalent d'acide sulfurique qui se recombinent pour reproduire le sulfate décomposé. La *résultante* électrolytique de la transmission des deux courants est donc *nulle*, et tout se passe, en *apparence*, comme si l'équilibre électrique n'était troublé ni dans un sens ni dans l'autre.

§ II. — Action inductrice des aimants.

Soit B (Fig. 335) une spirale plane en communication avec les extrémités d'un galvanomètre G.—Dans une di-

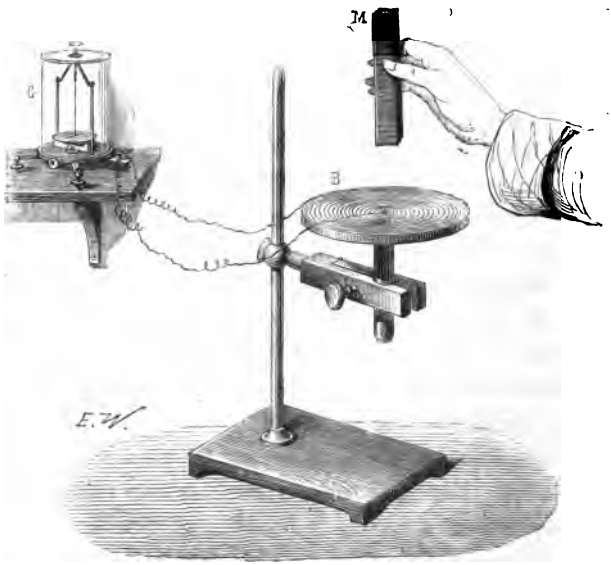


Fig. 335.

rection perpendiculaire à sa surface, approchons rapide-

ment le pôle d'un aimant M. L'aiguille du galvanomètre est déviée par un courant *induit inverse* ou *négatif* par rapport au courant circulaire qui, dans la théorie d'Ampère, représente le pôle *inducteur*. — L'aiguille retombe immédiatement à *zéro*, et conserve cette position tant que la distance du barreau à la spirale ne change pas. — Éloignons rapidement le pôle de l'aimant suivant la même direction perpendiculaire à la surface de la spirale ; le galvanomètre accuse la production d'un nouveau courant *induit*, mais *direct* ou *positif* par rapport au courant circulaire qui représente le pôle *inducteur*.

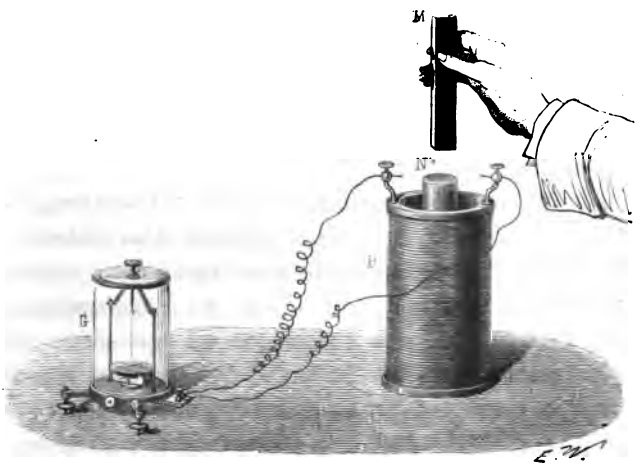


Fig. 336.

Les mêmes effets sont produits quand, au barreau M, on substitue un électro-aimant.

Dans une spirale cylindrique B (Fig. 336) mise en com-

munication avec les extrémités d'un galvanomètre G, plaçons un cylindre N de fer doux. En face de l'extrémité supérieure du cylindre N et sur son axe, plaçons un aimant M. — Au moment où l'aimant M est vivement *approché*, le cylindre N *devient* lui-même un aimant, et l'aiguille du galvanomètre est déviée par un courant induit *inverse* ou *négatif* par rapport aux courants circulaires qui représentent l'aimantation du cylindre *inducteur* N.— L'aiguille retombe immédiatement à *zéro*, et reste dans cette position tant que la distance de l'aimant M ne change pas, c'est-à-dire tant que l'aimantation du cylindre N ne varie pas. — Au moment où l'aimant M est rapidement *éloigné*, le cylindre N *cesse* d'être un aimant, et l'aiguille est déviée par un courant *induit direct* ou *positif* par rapport aux courants qui représentaient l'aimantation du cylindre *inducteur* N.

Ainsi, en résumé :

Un pôle magnétique qui se *rapproche*, un pôle magnétique qui s'*établit*, un pôle magnétique dont l'intensité *augmente*, développent dans le circuit fermé d'une bobine un courant *induit inverse* ou *négatif;* un pôle magnétique qui s'*éloigne*, un pôle magnétique qui *cesse d'être*, un pôle magnétique dont l'intensité *diminue*, développent dans la même bobine un courant *induit direct* ou *positif*.

Les barreaux aimantés se conduisent donc absolument comme les cylindres électro-dynamiques, ou solénoïdes, auxquels ils sont assimilés dans la théorie d'Ampère.

Soit M (Fig. 337) un barreau aimanté dont l'extrémité E

représente le pôle austral. En E, le courant marche dans le sens des flèches.— Rapprochons M de la spirale B ; cette spirale est traversée par un courant induit *inverse ;* par conséquent, l'extrémité E′ de cette spirale devient un pôle *austral*, et agit par *répulsion* sur l'extrémité E du barreau M qui se *rapproche*.

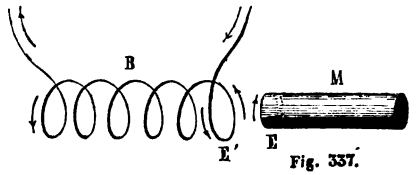


Fig. 337.

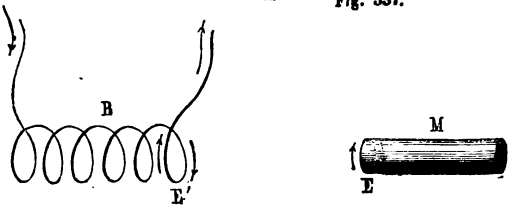


Fig. 338.

Écartons vivement (Fig. 338) le barreau M de la spirale B. Cette spirale est traversée par un courant induit *direct ;* par conséquent, son extrémité E′ devient un pôle *boréal*, et agit par *attraction* sur l'extrémité australe E du barreau M qui s'*éloigne*.

Ces expériences montrent que, quand l'induction est produite par le mouvement relatif d'un barreau aimanté et d'un circuit métallique, la réaction électro-dynamique des courants induits développés et du barreau inducteur est conforme aux indications de la loi générale de Lenz (page 168). Cette loi peut donc nous servir à prévoir le

sens de tout courant induit développé dans un circuit métallique, qui change de position par rapport à un barreau aimanté.

D'ailleurs, il est facile de voir que, dans le cas de l'induction magnéto-électrique, comme dans le cas de l'induction électro-électrique (page 170) :

1° Pour un mouvement relatif d'un circuit métallique fermé et d'un aimant inducteur exécuté entre les mêmes limites de distance, ou pour une même variation d'intensité de l'aimant inducteur, l'action inductrice *totale* reste *constante*, et met en mouvement, dans le circuit induit, une *quantité* d'électricité *constante*, et *indépendante de la vitesse* du mouvement relatif ou de la variation d'intensité de l'aimant inducteur.

2° L'*intensité* de la force électromotrice développée dans le circuit métallique, ou la *tension* du courant induit qui le traverse, augmente et diminue en même temps que la *vitesse* du mouvement relatif ou de la variation d'intensité de l'aimant inducteur.

Soit *a* (Fig. 339) le pôle *austral* d'un barreau aimanté M vu en plan, ou d'une grosse spirale placée dans le circuit d'une pile ; soit, en outre, DE un fil métallique rectiligne placé au-dessus du pôle *a* et dans le circuit d'un galvanomètre. Faisons rapidement passer ce fil de la position DE à la position D'E', et puis faisons-le revenir de la position D'E' à la position DE.

1° Le fil est transporté de DE en D'E'. — Pendant la première moitié de ce mouvement, le courant induit doit marcher de D en E, c'est-à-dire dans un sens tel que le fil DE soit *repoussé* par le pôle dont il se *rapproche*. —

Pendant la deuxième moitié du mouvement, le fil DE doit être *attiré* par le pôle *a* dont il s'*éloigne*, et, comme le fil a changé de côté par rapport à ce pôle, le courant induit doit continuer à marcher de D en E.

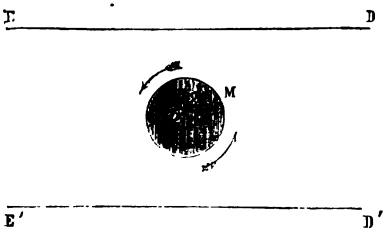


Fig. 339.

2° Le fil est transporté de D'E' en DE. — Le même raisonnement indique que, pendant toute la durée de ce mouvement, le fil DE doit être traversé par un courant *induit* dirigé de E en D.

L'expérience confirme l'exactitude de ces deux déductions de la loi générale de Lenz.

Soit M (Fig. 340) un aimant, ou un électro-aimant, ou même une forte spirale placée dans le circuit d'une pile. A est la branche *australe*, et B la branche *boréale* de l'appareil. La ligne *ab* qui joint les centres *a*, *b* des surfaces polaires prend le nom de *ligne axiale;* une perpendiculaire menée sur le milieu de *ab* dans le plan commun des deux surfaces polaires prend le nom de *ligne équatoriale*.

Dans le plan vertical de la ligne équatoriale et à très faible distance du plan des surfaces polaires, plaçons un fil métallique horizontal DE en communication, par ses extré-

mités, avec le circuit d'un galvanomètre. Autour du point de croisement C du fil et de la ligne axiale *ab*, imprimons à DE un mouvement de rotation dans un plan horizontal et dans le sens indiqué par les flèches. En appliquant la loi de Lenz à ce cas particulier, nous trouvons que :

1° Pendant le premier quart de révolution, le courant *induit* doit être dirigé de D en E, pour que les portions DC et CE du fil mobile soient repoussées par le pôle *austral* A et par le pôle *boréal* B dont elles se *rapprochent*. — Pendant le deuxième quart de révolution, les mêmes portions du fil

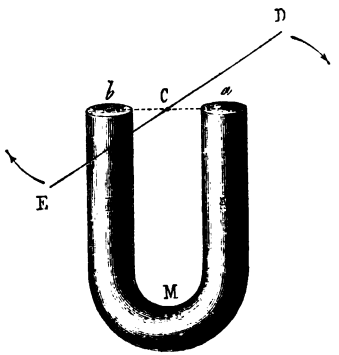


Fig. 340.

s'*éloignent*, la première du pôle *austral*, la seconde du pôle *boréal* ; par conséquent, le courant *induit* doit continuer à marcher de D en E, pour que les portions DC et CE du fil soient *attirées* par les pôles dont elles s'*éloignent*. Ainsi, pendant toute la durée de la première demi-révolution, le courant *induit* doit marcher de D en E dans le fil DE.

2° Pendant le troisième et le quatrième quart de révolution, les influences des pôles A, B, sont les mêmes, mais

la position du fil est renversée; par conséquent, pendant toute la durée de la deuxième demi-révolution, le courant *induit* doit marcher de E en D dans le fil mobile.

La déviation de l'aiguille du galvanomètre montre, en effet, que tel est le sens du courant induit, pendant la durée de chacune des demi-révolutions exécutées par le fil DE.

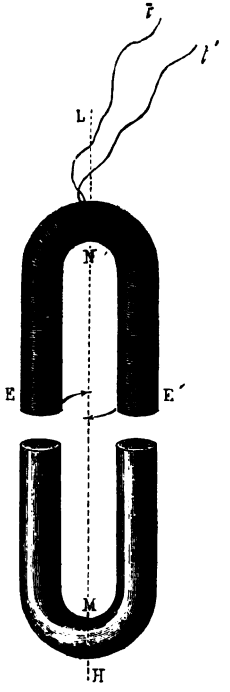


Fig. 341.

Soit M (Fig. 341) un aimant, ou un électro-aimant, ou même une forte spirale placée dans le circuit d'une

pile. A et B sont les surfaces polaires, *australe* et *boréale*, de cet appareil *inducteur*. Soit, en outre, N une forte spirale dont le fil *t t'* ferme le circuit d'un galvanomètre, mobile autour de l'axe vertical LH, et dont les extrémités E, E', sont placées en face et à petite distance des surfaces polaires A, B.

Imprimons à la spirale *induite* N un mouvement de rotation dans le sens des flèches placées en E, E', et cherchons, à l'aide de la loi de Lenz, quel est le sens du courant *induit* pendant les diverses périodes du déplacement.

1° Pendant le premier quart de révolution, E s'*éloigne* de A, E' s'*éloigne* de B; pour que la réaction électro-dynamique soit *attractive*, E doit *devenir* un pôle *boréal* et E' un pôle *austral*. — Pendant le deuxième quart de révolution, E se *rapproche* de B, E' se *rapproche* de A; pour que la réaction électro-dynamique soit *répulsive*, E doit *rester* un pôle *boréal* et E' un pôle *austral*. — Pendant toute la durée de la première demi-révolution de la spirale N, les extrémités E, E', *conservent* le *même signe magnétique*, le courant *induit* doit donc aussi *conserver* le *même sens*.

2° Le même raisonnement prouve que le courant *induit* doit *changer de sens* au moment où commence la deuxième demi-révolution, et *conserver*, pendant toute la durée de cette deuxième demi-révolution, un *sens opposé* à celui qu'il avait pendant la première demi-révolution de la spirale N.

La déviation de l'aiguille du galvanomètre prouve, en effet, que le courant *induit* change de sens à chaque demi-révolution, et que le sens de ce courant, pendant chaque

demi-révolution, correspond exactement aux indications de la loi de Lenz.

Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'intensité de l'action inductrice. — La propriété dont jouissent les barreaux de fer doux de s'aimanter sous l'influence d'un courant voltaïque, et de retomber instantanément à l'état neutre quand le circuit de la pile est rompu, a été utilisée pour augmenter l'intensité des courants induits.

Au centre de la spirale cylindrique B en communication avec un galvanomètre G (Fig. 342), plaçons une spi-

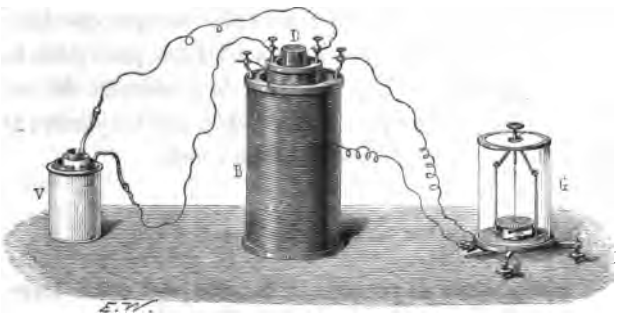


Fig. 342.

rale A dont le fil complète le circuit d'un électromoteur V. Au centre de cette dernière spirale A, plaçons un cylindre de fer doux D. Dès que le circuit de l'électromoteur est fermé, le cylindre de fer doux devient un aimant, reste aimanté tant que le courant circule, et perd toute trace d'aimantation au moment où le circuit est rompu. De plus, les courants circulaires de l'aimant temporaire D

marchent dans le même sens que les courants de la spirale inductrice A. Dès lors :

Au moment où le circuit de l'électromoteur est fermé, la spirale *induite* B est influencée par deux actions *inductrices* concordantes, celle du courant qui *commence* en A et celle du barreau D qui *devient* un aimant ; au moment où le circuit de l'électromoteur est rompu, la spirale B est également soumise à deux actions *inductrices* concordantes, celle du courant qui *finit* en A, et celle du barreau D qui *cesse* d'être un aimant. Il résulte évidemment de là que le courant *inverse* et le courant *direct* développés dans la spirale B, au moment où le circuit voltaïque est *fermé* et au moment où il est rompu, sont plus intenses que dans le cas où le cylindre de fer doux n'est pas placé dans la spirale. D'ailleurs, l'augmentation de l'intensité de ces courants est d'autant plus considérable, que le cylindre D prend lui-même une *aimantation* plus forte.

§ III. — Induction terrestre.

Il était naturel de penser que la terre peut aussi développer des courants d'induction dans des circuits métalliques fermés ; les recherches de M. Faraday ont démontré l'exactitude de cette prévision. Pour bien comprendre les expériences destinées à mettre en évidence les courants produits par l'induction terrestre, il suffit de se rappeler que l'action du globe peut être représentée par celle d'un vaste barreau aimanté parallèle à l'axe de l'aiguille d'inclinaison. D'ailleurs, dans notre hémisphère boréal, le pôle boréal de l'aimant terrestre est tourné vers la surface

du globe, et, par conséquent, tous les conducteurs sur lesquels nous agissons sont eux-mêmes situés au-dessus de cette surface polaire.

M. Faraday (1) a indiqué une manière très simple et très élégante de mettre en évidence l'induction terrestre. Soit G (Fig. 343) un galvanomètre dont le fil étendu en

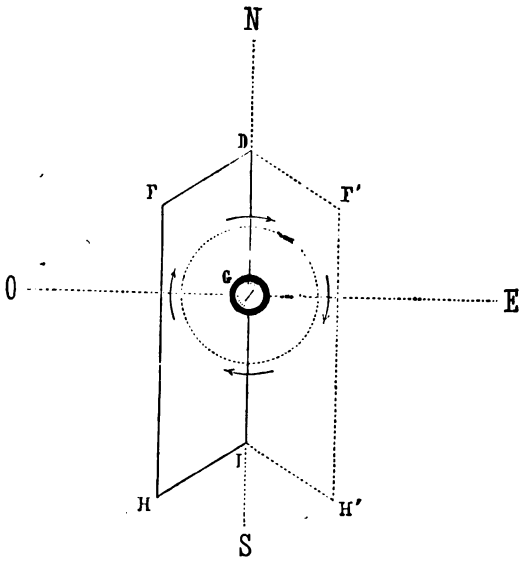


Fig. 343.

ligne droite ID, du sud au nord, est replié de manière à former un rectangle DFHI. Ce galvanomètre peut être considéré comme occupant le centre de la surface polaire boréale de l'aimant terrestre ; les flèches indiquent le sens

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1832, t. L, p. 124.

du courant sur cette surface polaire boréale. Si, autour du côté ID comme axe, nous faisons tourner le rectangle de l'ouest à l'est, de manière que le côté FH passe par-dessus le galvanomètre et vienne occuper la position F'H', il doit se développer, en HF, un courant induit dirigé du sud au nord, ou de H en F ; et, en effet, la déviation de l'aiguille du galvanomètre accuse l'existence d'un courant de ce sens. Lorsque le rectangle est ramené de la position F'H' à la position FH par un mouvement de l'est à l'ouest, le galvanomètre accuse, dans le fil FH, un courant induit dirigé du nord au sud, ou de F en H. Il est facile de voir que le sens de ces courants *induits* reste, dans tous les cas, conforme aux indications de la loi de Lenz.

Le galvanomètre conservant la même position, les fils peuvent être disposés de manière que les côtés FH et ID du rectangle soient dirigés de l'est à l'ouest. Faisons toujours tourner ce rectangle autour de ID comme axe. Dans ce cas, lorsque FH se meut du nord au sud, l'aiguille aimantée accuse un courant induit, en FH, dirigé de l'ouest à l'est; quand FH se meut du sud au nord, le courant induit marche de l'est à l'ouest.

Des phénomènes du même genre se produisent toutes les fois que FH est porté d'un côté à l'autre du galvanomètre, quel que soit l'azimuth dans lequel s'exécute le mouvement du fil.

Soit MN (Fig. 344) une spirale parallèle à l'aiguille d'inclinaison, et dont le circuit est fermé au moyen d'un galvanomètre G. Le bout N est tourné vers la terre. Tout en maintenant son axe dans le plan du méridien magnétique, faisons exécuter à cette spirale une demi-révolution

sur son centre. Pendant que ce mouvement s'accomplit, l'aiguille du galvanomètre accuse l'existence, dans cette spirale, d'un courant *induit* d'un certain sens; si nous ramenons ensuite la spirale dans sa position première, en lui faisant exécuter une seconde demi-révolution, elle est

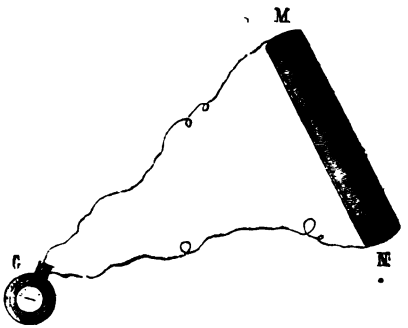


Fig. 344.

traversée par un nouveau courant *induit* de *sens inverse*. D'ailleurs, le sens de ces courants induits peut facilement être prévu; en effet, l'expérience, d'accord avec la loi de Lenz, prouve que, pendant la première demi-révolution, c'est-à-dire pendant que N s'*éloigne* et M s'*approche* du pôle *boréal* terrestre, N est un pôle *austral* et M un pôle *boréal;* au contraire, pendant la seconde demi-révolution, c'est-à-dire pendant que N s'*approche* et M s'*éloigne* du pôle *boréal* terrestre, N devient un pôle *boréal* et M un pôle *austral*.

Quand on place un barreau de fer doux dans l'axe de la spirale MN, ce barreau se polarise sous l'influence de l'aimant terrestre. L'intensité et même la nature du ma-

gnétisme de ses extrémités changent pendant les déplacements de la spirale; ce barreau devient donc un véritable appareil *inducteur*. Il est facile de voir, d'ailleurs, que son action *inductrice* concorde avec celle que la terre exerce elle-même directement sur la spirale. L'expérience démontre, en effet, que l'intensité des courants induits développés par les déplacements de la spirale MN devient beaucoup plus considérable après l'introduction de ce barreau de fer doux.

Nous n'insisterons pas plus longuement sur l'action inductrice de la terre, les expériences précédentes suffisent pour démontrer son existence. Ajoutons, d'ailleurs, que MM. Palmieri et Linari sont parvenus à reproduire, avec les courants induits développés sous l'influence du globe terrestre, tous les effets que l'on peut obtenir avec des appareils fondés sur l'induction des courants voltaïques et des aimants.

§ IV. — Courants induits de divers ordres.

Tout courant induit peut, à son tour, exercer une action inductrice sur les conducteurs voisins, et développer des courants induits dans un circuit métallique fermé. Nous appellerons courant induit de *premier ordre* celui qui se développe dans un circuit métallique au moment où un courant voltaïque est *fermé* ou *interrompu;* courant induit de *deuxième ordre*, celui qui est produit par un courant induit de *premier ordre;* courant induit de *troisième ordre*, celui qui est dû à l'action d'un courant induit de *deuxième* ordre; et ainsi de suite. M. Henry (de

Princeton) (1) a publié un très beau travail sur la génération et les propriétés de ces courants induits d'ordres supérieurs.

Dans la Figure 345, vue en plan, A est une spirale en communication avec une pile P et avec une des roues de l'appareil à isolement des courants induits R ; cette spi-

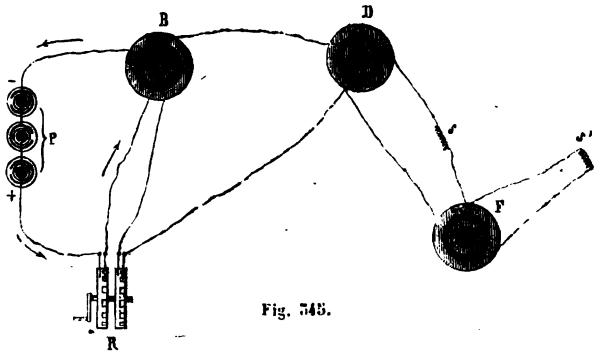


Fig. 345.

rale A est traversée par le courant voltaïque inducteur. La spirale B, la spirale C et la seconde roue de l'appareil R forment un second circuit. La spirale D et la spirale E forment un troisième circuit. Enfin, le circuit de la spirale F est lui-même fermé en *s'*.

Quand l'appareil R est en mouvement, B est traversé par des courants induits de *premier ordre*, qui sont à volonté tous *inverses* ou tous *directs* par rapport au courant voltaïque *inducteur* de la spirale A. Mais le courant induit de *premier ordre* qui traverse B passe aussi dans la

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1841, t. III, p. 396.

spirale C, et joue le rôle de courant *inducteur* par rapport à la spirale D dans laquelle il développe des courants induits de *deuxième ordre*. Ces courants induits de *deuxième ordre* traversent la spirale E, et jouent, à leur tour, le rôle de courants *inducteurs* par rapport à la spirale F dans laquelle ils développent des courants induits de *troisième ordre*.

Dans tout courant induit, quelque courte que soit sa durée, il faut distinguer deux périodes : l'une pendant laquelle son intensité *augmente*, l'autre pendant laquelle son intensité *diminue*. On est donc naturellement porté à admettre que tout courant induit, à quelque ordre qu'il appartienne, peut développer *deux* courants induits dans un circuit métallique fermé : l'un *inverse* et correspondant à sa *période d'accroissement*, l'autre *direct* et correspondant à sa *période de décroissement*. Cette manière de comprendre l'action des courants induits sur les conducteurs voisins est complétement d'accord avec les résultats de l'expérience. En effet :

1° Soient *s*, *s'*, deux petites spirales supplémentaires, dont chacune est munie d'une aiguille d'acier trempé placée dans son intérieur. Quand l'appareil R a marché pendant un certain temps, on trouve que ces deux aiguilles sont aimantées d'une manière permanente. Par conséquent, le courant induit de *premier ordre* développé en B a joué, en C, le rôle de courant *inducteur*, et a développé des courants induits de *deuxième ordre* dans la spirale D. De même les courants induits de *deuxième ordre* développés en D ont joué, en E, le rôle de courants *inducteurs*, et ont développé des courants induits de *troisième ordre* dans

la spirale F. On peut constater le sens de l'aimantation communiquée aux aiguilles, et s'en servir pour déterminer le sens des courants induits de divers ordres développés dans cette série de spirales. En affectant du signe + le courant voltaïque inducteur et tous les courants induits de *même sens*, et du signe — tous les courants induits de *sens opposé*, on trouve que les résultats sont représentés par le tableau suivant :

Courant voltaïque *inducteur*	+	+
Courant induit de *premier ordre* auquel l'appareil R livre passage	+	—
Courant induit de *deuxième ordre* produisant l'aimantation en *s*	—	+
Courant induit de *troisième ordre* produisant l'aimantation en *s'*	+	—

Si l'on s'en rapportait d'une manière absolue aux indications de ces résultats, on serait donc conduit à admettre qu'*un* courant induit d'un ordre quelconque ne développe, dans un circuit voisin, qu'*un seul* courant induit d'un *ordre supérieur* et de *sens opposé au sien*. Mais nous avons vu (page 199) que, quand une spirale est traversée par deux courants induits *d'inégale tension*, l'aimantation communiquée à l'aiguille d'acier qu'elle contient ne traduit que l'action du courant le plus intense. Le procédé de l'aimantation est donc insuffisant pour vider la question de savoir si un courant induit développe *un* ou *deux* courants induits *d'ordre supérieur* dans un circuit métallique voisin.

2° Remplaçons les spirales *s*, *s'* par deux galvanomètres. Quel que soit le sens du courant induit de *premier ordre*

auquel l'appareil R livre passage, quand le mouvement de rotation est rapide, les aiguilles de ces galvanomètres restent en équilibre et immobiles sur le *zéro* de la graduation. Ce résultat rapproché du précédent montre que tout courant induit développe, dans un circuit voisin, deux courants induits d'*ordre supérieur*, égaux en *quantité*, de *sens contraires*, et inégaux en *tension*.

3° M. Verdet (1) s'est servi de l'action électrolytique, pour mettre en évidence le mode d'action d'un courant induit sur les circuits fermés voisins. Cette méthode lui a fourni des résultats à l'abri de toute objection. Les spirales s, s' (Fig. 346), sont remplacées par des voltamètres à eau acidulée. Quand l'appareil R a marché pendant un certain

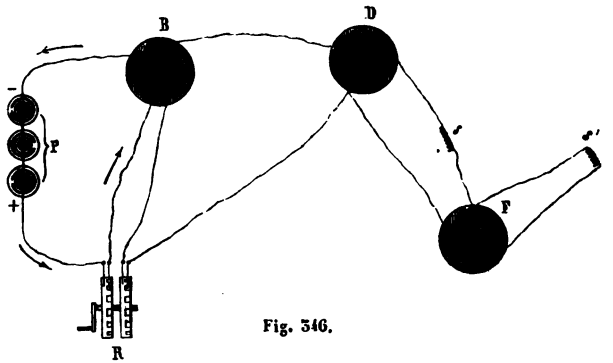


Fig. 346.

temps, les cloches des voltamètres contiennent, *chacune*, de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour reproduire de l'eau. M. Matteucci (2) a

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXIX, p. 501.
(2) *Cours spécial sur l'induction*. Paris, 1854, p. 28.

confirmé l'exactitude de ces faits, en remplaçant les voltamètres à eau par des dissolutions saturées de sulfate de cuivre. Dans ce cas, on n'obtient aucune trace apparente de décomposition, bien que les courants passent. Ce résultat négatif indique évidemment que l'acide sulfurique, l'oxygène et le cuivre sont, tous les trois, mis en liberté à la surface de chaque électrode dans les proportions convenables pour reproduire le sulfate décomposé, et se recombinent.

Les faits fournis par ces trois ordres d'expérimentation établissent d'une manière incontestable la vérité des propositions suivantes :

a. Un courant induit de sens déterminé et d'*un ordre quelconque*, agit comme un courant voltaïque sur un circuit métallique fermé. — Pendant sa période d'*accroissement*, il développe un courant induit *inverse*. — Pendant sa période de *décroissement*, il développe un courant induit *direct*.

b. La *durée* de la période d'*accroissement* d'un courant induit quelconque est plus *courte* que celle de sa période de *décroissement*, mais la *somme* des actions inductrices correspondantes à ces deux périodes est la *même*.

c. Les deux courants induits d'*ordre supérieur* développés, dans un circuit métallique fermé, par un courant induit d'un *ordre quelconque*, sont *égaux en quantité*, et n'ont pas la *même tension*. — Le courant induit *inverse*, comme correspondant à une action inductrice de *plus courte durée*, a *plus de tension* que le courant induit *direct*.

De ces propositions, dont l'exactitude a été confirmée d'une manière éclatante par les expériences toutes récentes

de M. Masson (1), ressort une différence notable entre les courants *voltaïques* et les courants *induits* employés comme agents d'induction.

Quand l'action inductrice est exercée par un courant *voltaïque*, nous savons que, des deux courants *induits* de *premier ordre* développés dans un circuit fermé, le *plus intense* est le courant *direct*, c'est-à-dire celui qui correspond à l'*interruption*, ou à la période de *décroissement* du courant *inducteur*.

Quand, au contraire, l'action inductrice est exercée par un courant *induit d'un ordre quelconque*, les faits précédents montrent que, des deux courants *induits d'ordre supérieur* développés dans un circuit fermé, le *plus intense* est le courant *inverse*, c'est-à-dire celui qui correspond à la période d'*accroissement* du courant *inducteur*.

Influence des diaphragmes placés entre les spirales inductrice et induite. — Dans la Figure 347 vue en plan, A est une spirale cylindrique *inductrice* en communi-

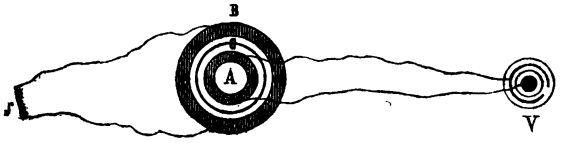


Fig. 347.

cation avec le couple hydro-électrique V, B est une spirale cylindrique *induite*, et C est un diaphragme cylindrique placé entre les deux bobines. — Il résulte des recherches

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1856, t. XLIII, p. 1115.

de M. Henry (de Princeton) (1) que l'action *inductrice* de la spirale A sur la spirale B n'est influencée ni par la présence, ni par la nature, ni par l'épaisseur du diaphragme C, pourvu que ce diaphragme soit lui-même un *corps isolant* et que la distance des deux bobines reste la même.

Mais, si le diaphragme C est un cylindre *métallique*, *l'aimantation* d'une aiguille d'acier trempé placée dans la spirale supplémentaire *s*, qui complète le circuit de la spirale *induite* B, devient d'autant plus faible que le diaphragme interposé C est plus épais. D'après les observations de M. Henry, cette influence des diaphragmes métalliques sur l'intensité de l'aimentation communiquée par les courants *induits* de la spirale B est due à l'action de courants *induits* développés en même temps dans le diaphragme interposé. Aussi, pour annuler complétement l'influence de ces diaphragmes métalliques, suffit-il de pratiquer une fente dans toute leur longueur et suivant une de leurs arêtes ; les diaphragmes *métalliques* se conduisent alors comme des *corps isolants*. Dans ce cas, en effet, il ne peut plus s'établir de courants induits dans le diaphragme, parce que tous les circuits partiels que ces courants pourraient suivre se trouvent interrompus.

Les diaphragmes métalliques interposés agissent sur l'*étincelle* des courants induits comme sur leurs propriétés *d'aimantation*. Sous leur influence, les étincelles perdent de leur éclat et de leur intensité.

En place de la spirale supplémentaire *s*, faisons entrer un *galvanomètre* ou un *voltamètre* dans le circuit de la bobine

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1841, t. III, p. 399.

induite B. — L'expérience démontre que les diaphragmes métalliques interposés n'exercent aucune influence ni sur la *réaction électro-magnétique*, ni sur la puissance *électrolytique* des courants *induits* de la spirale B. L'amplitude de la déviation de l'aiguille aimantée et la quantité de liquide électrolytiquement décomposé ne sont nullement altérées par la présence de ces diaphragmes *métalliques*.

Remplaçons le diaphragme métallique C par une spirale. — Tant que son circuit reste ouvert, cette spirale *additionnelle* n'exerce aucune influence sur les courants *induits* développés en B. — Quand, au contraire, le circuit de la spirale *additionnelle* est fermé, les courants *induits* développés en B perdent de leur *tension*.

Ce que nous savons de l'action des courants induits sur les conducteurs voisins suffit pour rendre compte de l'influence des diaphragmes métalliques placés entre la spirale induite et la spirale inductrice. — Supposons, en effet, que le courant *inducteur* de la bobine A soit *interrompu*. A ce moment, un courant *induit direct de premier ordre* est développé, en même temps, dans le diaphragme C et la spirale B. Mais, à son début, le courant *induit* en C développe, en B, une force électromotrice *inverse*, *de deuxième ordre*, *opposée* à celle du courant *induit de premier ordre* de la spirale B, et qui en diminue l'intensité. Au moment où il finit, le courant induit en C développe, en B, une force électromotrice *directe*, de *deuxième ordre*, qui *s'ajoute* à celle du courant *induit de premier ordre* de la spirale B et en augmente l'intensité. Par le fait du développement simultané des deux courants *induits de premier*

ordre, l'un en B, l'autre en C, le premier est *affaibli* pendant toute la période *d'accroissement* du second, et au contraire le premier est *renforcé* pendant toute la période de *décroissement* du second. En somme, au milieu de ces alternatives d'*affaiblissement* et de *renforcement*, l'action inductrice *totale* subie par la spirale B conserve le *même signe* et la *même valeur*, mais sa *durée* est *prolongée*. Il en résulte nécessairement que le courant *induit* de *premier ordre* de la spirale B reste le *même en quantité*, et *perd de sa tension*. Comme d'ailleurs toutes ces actions se passent dans un temps très court, la déviation de l'aiguille aimantée et les effets électrolytiques restent l'expression fidèle de la *quantité* d'électricité mise en mouvement, et ne sont pas influencés par la présence des diaphragmes métalliques. Mais l'*aimantation* de l'aiguille d'acier et l'*étincelle*, qui traduisent surtout la *tension* du courant induit, sont *affaiblies*, l'une et l'autre, par l'interposition de ces diaphragmes. — Il est évident que les choses se passent de même au moment où le circuit *voltaïque* est *fermé*, et que le courant *inverse* de *premier ordre* développé dans la spirale B doit rester le *même en quantité* et *perdre de sa tension*.

La même explication rend compte des faits constatés par MM. Masson et Breguet dans leur Mémoire déjà cité sur l'induction (1). Ces deux physiciens ont montré que la présence d'une bobine *fermée sur elle-même* dans le voisinage d'une bobine traversée par un courant voltaïque affaiblit considérablement l'intensité de l'*extra-courant*.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 140.

— Quand le circuit de la bobine est fermé au moyen d'un *conducteur additionnel*, son influence est moindre, et d'autant plus faible que la résistance de ce conducteur additionnel est plus grande. — Enfin, l'influence de la bobine voisine est nulle, quand son circuit reste ouvert.

Nous avons vu (page 211) que, pour augmenter l'action de la spirale inductrice, on place dans son intérieur un cylindre de fer doux. Ce cylindre s'aimante au moment où le courant voltaïque commence, et perd son aimantation au moment où le courant finit. Les actions inductrices du courant et du cylindre de fer doux sont donc de même sens, et s'ajoutent.

Soient : A (Fig. 348) une spirale inductrice, D un cylindre de fer doux, B la spirale induite. Au moment où le

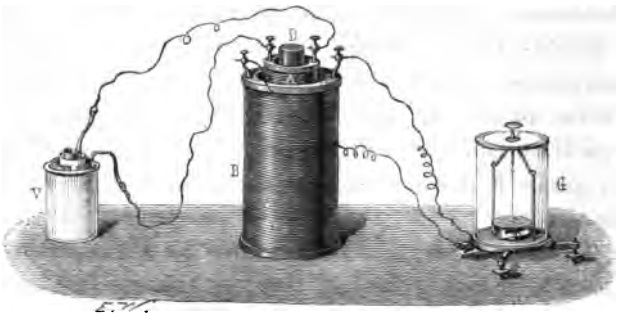


Fig. 348.

circuit de la spirale A est fermé, le cylindre D s'aimante ; mais, en outre, sa surface est parcourue par des *courants induits inverses*. — Au moment où le circuit de la spirale A est rompu, le cylindre D perd son aimantation ; mais, en

outre, sa surface est parcourue par des *courants induits directs.*

Ces courants induits *inverses* et *directs*, alternativement développés dans les couches superficielles du cylindre de fer doux D, réagissent à leur tour sur la spirale induite B, et produisent les mêmes effets que les courants induits développés dans les diaphragmes métalliques placés entre la spirale inductrice et la spirale induite; ils affaiblissent l'élément *tension*, et n'exercent aucune influence sur l'élément *quantité* des courants induits développés dans la spirale B.

Pour obvier à cet inconvénient, il suffit de remplacer le *cylindre* de fer doux D par un *faisceau* de fils de fer recouverts d'une légère couche de vernis à la gomme-laque. Le faisceau passe par les mêmes variations d'aimantation que le cylindre, mais le développement des courants induits est empêché par l'isolement des fils qui le composent. On peut même se dispenser d'enduire les fils de vernis à la gomme-laque, leur surface se recouvre de légères couches d'oxyde suffisantes pour les isoler.

Conformément à ce que la théorie permettait de prévoir, les effets de *quantité* (actions galvanométrique et électrolytique) des courants induits développés dans la spirale B restent les mêmes, après la substitution du faisceau de fils de fer au cylindre de fer doux; mais tous les effets de *tension* de ces courants (étincelle à l'air libre, aimantation d'une aiguille d'acier trempé) gagnent en intensité.

§ V. — Action inductrice des décharges d'électricité statique.

Dès 1831, M. Faraday (1) essaya de déterminer des courants d'*induction* avec les courants de décharge d'une bouteille de Leyde. Il n'obtint que des *effets douteux* d'aimantation d'aiguilles d'acier placées dans une bobine. Cependant, ajoute-t-il, « il ne s'ensuit pas que la décharge » de l'électricité statique par un fil métallique ne puisse » pas produire des effets analogues à ceux qu'on obtient » avec l'électricité voltaïque; mais, comme il semble im- » possible de séparer les effets produits au moment que » la décharge commence, d'avec les effets égaux et con- » traires qui ont lieu lorsque la décharge finit, par la » raison qu'avec l'électricité statique ces moments sont » simultanés, il est à peine permis d'espérer qu'on puisse » les observer dans les expériences faites par ce moyen. »

Dès 1834 (2), M. Masson, dans une lettre adressée à l'Académie des sciences, annonçait qu'il était parvenu à aimanter une aiguille d'acier au moyen des courants *induits* déterminés par des décharges de bouteilles de Leyde. MM. Henry (de Princeton) (3), Riess (4), Marianini (5) firent, à peu près simultanément et indépendamment les uns des autres, une étude approfondie de l'action

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 6. — *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1832, t. L, p. 13.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1840, t. LXXIV, p. 159, en note.

(3) *Ibid.*, 3e série, 1841, t. III, p. 394.

(4) *Ibid.*, 2e série, 1840, t. LXXIV, p. 158.

(5) *Ibid.*, 1844, t. X, p. 498.

inductrice des décharges d'électricité statique. Depuis, MM. Dove(1), Knochenhauer(2), Matteucci (3) et beaucoup d'autres physiciens se sont occupés du même sujet. Mais l'étude la plus complète, et surtout la plus remarquable par l'exactitude du procédé expérimental, qui ait été faite de l'action inductrice des courants de décharge, est celle que M. Verdet a publiée en 1848 (4).

M. Verdet, frappé de l'incertitude des résultats fournis par l'aimantation de l'acier et du fer doux, et par les indications galvanométriques, a eu l'heureuse idée de recourir aux effets électrolytiques des courants induits pour étudier l'action *inductrice* des décharges d'électricité statique; le phénomène connu sous le nom de *polarisation des électrodes* lui servait à mettre en évidence l'action chimique de ces courants *induits*. Nous n'entrerons pas ici dans le détail des précautions prises par cet habile physicien, pour se mettre à l'abri de toutes les causes d'erreur; nous nous contenterons de rapporter les résultats généraux de son travail.

Toutes les fois que le circuit *induit* est *entièrement continu*, on n'obtient de polarisation sensible qu'avec des décharges extrêmement fortes. D'ailleurs, les traces de polarisation fournies par ces fortes décharges indiquent que le courant *induit* marche dans le sens de la *décharge inductrice*.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 336.

(2) *Ibid.*, 3e série, 1846, t. XVII, p. 75.

(3) *Ibid.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 153. — *Cours spécial sur l'induction*. Paris, 1854.

(4) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1848, t. XXIV, p. 371.

M. Verdet a pratiqué une interruption dans le circuit *induit;* l'étincelle avait lieu entre une pointe métallique et la surface d'une petite masse de mercure placée dans une capsule. La distance de la pointe métallique au mercure pouvait être augmentée ou diminuée à volonté; elle était toujours mesurée très exactement. Avec cette disposition, la *polarisation* est généralement assez forte, et peut s'élever jusqu'à dévier de 90° l'aiguille du galvanomètre.

Lorsque la pointe représente le pôle *positif* et le mercure le pôle *négatif* d'un courant de même sens que la décharge, le sens de la polarisation est *constant*. Quelle que soit la distance de la pointe au mercure, le sens du courant *induit*, conclu de celui de la polarisation, est le *même* que celui de la *décharge inductrice*.

Lorsque la pointe représente le pôle *négatif*, et le mercure le pôle *positif* d'un courant de même sens que la décharge, si la distance est petite, le sens de la polarisation est *variable;* mais, à partir d'une certaine distance et pour les valeurs supérieures, le sens du courant *induit* devient *constant*, et est le *même* que celui de la *décharge inductrice*.

Si l'on introduit, dans le circuit du courant *induit*, deux interruptions semblables, disposées de façon que le mercure représente dans l'une le pôle *négatif* et dans l'autre le pôle *positif* d'un courant de même sens que la décharge, alors toute irrégularité disparaît, et le sens du courant induit, conclu du sens de la polarisation, est le *même* que celui de la *décharge inductrice*.

Enfin, ni la distance des deux spirales, ni la conductibilité du circuit inducteur, ni la conductibilité du circuit induit n'ont d'influence sur la marche générale des phénomènes.

Ces résultats sont complétement indépendants de la nature de l'électricité qui a servi à charger la batterie électrique.

Pour se rendre compte de ces résultats, M. Verdet admet, conformément aux idées émises par M. Faraday, que la décharge d'une batterie doit être divisée en deux périodes. Dans la première, la vitesse de l'électricité s'accélère et produit, dans le circuit voisin, un courant *induit inverse;* dans la seconde, la vitesse de l'électricité diminue et produit, dans le circuit voisin, un courant *induit direct*. Ces deux périodes n'ont probablement pas la même *durée* et la *deuxième* est plus courte que la *première*. Il en résulte que :

1° Dans les deux courants *induits*, la *quantité* d'électricité mise en mouvement est la même.

2° La *durée* du courant *direct* est plus *courte* que celle du courant *inverse*. Par conséquent, la *tension*, ou la tendance à vaincre la résistance des mauvais conducteurs et à donner l'étincelle, est plus *grande* dans le courant *direct* que dans le courant *inverse*. Cette prédominance de *tension* du côté du courant *direct* est, d'ailleurs, parfaitement d'accord avec les résultats fournis par l'aimantation.

On comprend facilement ainsi pourquoi, avec un circuit *induit continu*, la polarisation est insensible; et pourquoi, quand le circuit *induit* est *interrompu*, l'action du courant *direct* devient prédominante et commande le sens de la polarisation.

Si, pour de très petites distances et lorsque le mercure représente le pôle positif du courant *direct*, le sens de la polarisation est quelquefois commandé par le courant *in-*

verse, cela tient à une circonstance particulière. Les expériences de M. De la Rive (1) prouvent que l'arc voltaïque, entre une pointe et une surface plane, s'établit plus facilement quand la pointe représente le pôle *positif* que dans le cas contraire. Lors donc que le pôle *positif* du courant *direct* est au mercure et celui du courant *inverse* à la pointe métallique, le courant *inverse*, bien qu'il ait moins de *tension*, peut cependant, si la distance est très petite, passer en plus forte proportion que le courant *direct* et commander le sens de la polarisation.

Enfin, M. Verdet a étudié, par le même procédé, les courants *induits* d'*ordres supérieurs* correspondants à un courant de décharge d'électricité statique. Il a constaté que chacun des courants de *premier ordre* produit deux courants induits de *second ordre*, opposés l'un à l'autre. Quand le circuit de *second ordre* est *entièrement continu*, les quatre courants de *second ordre* sont égaux en *quantité*, et se font équilibre; il n'y a pas de polarisation. Quand le circuit de *second ordre* est *interrompu*, la polarisation indique une prédominance *constante* du côté des courants de *second ordre* qui marchent en *sens inverse* de celui de la décharge de la batterie, et la polarisation est constamment produite dans cette direction.

Dans son Mémoire déjà cité (2), M. Masson a étudié avec beaucoup de soin cette question des courants induits de divers ordres développés par les décharges d'électricité

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1846, t. XXII, p. 690.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLIII, p. 1115.

statique. — Il a successivement employé, dans ses recherches, le voltamètre, le galvanomètre, et le réélectromètre de Marianini; les indications de ces trois appareils ont toujours été parfaitement d'accord entre elles, et avec les résultats précédents de M. Verdet, pour démontrer que :

1° Toute décharge de condensateur se conduit comme un courant voltaïque, et développe deux courants induits de *premier ordre*, de sens opposés, égaux en *quantité*, mais inégaux en *tension;* dans ce cas, quelle que soit l'origine du courant *inducteur*, c'est le courant *direct* qui l'emporte en *tension* ou en *intensité*.

2° L'action inductrice d'un courant *induit* correspondant à une décharge de condensateur est la même que celle d'un courant *induit* produit par un courant voltaïque inducteur. — Quel que soit l'*ordre* du courant *induit* jouant le rôle d'*inducteur*, ce courant développe deux courants induits d'*ordre supérieur*, de sens opposés, égaux en *quantité*, mais inégaux en *tension;* dans ce cas, quelle que soit l'origine du courant *inducteur primitif*, c'est le courant *inverse* qui l'emporte en *tension* ou en *intensité*.

ARTICLE II.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES COURANTS D'INDUCTION.

Propositions générales. — Après avoir étudié en détail les phénomènes d'induction développés dans des circuits fermés composés de fils métalliques, nous devons résumer, sous forme de propositions générales, les prin-

cipaux résultats des travaux de MM. Faraday (1), Masson (2), Riess (3), Lenz (4), Abria (5), Henry (de Princeton) (6), Dove (7), Marianini (8), Wartmann (9), Weber (10), Verdet (11), Felici (12), Gaugain (13), Matteucci (14), et autres physiciens qui se sont occupés de cette partie importante de la théorie physique de l'électricité.

1° L'action inductrice est indépendante de la *nature* du corps *isolant* placé entre le circuit *inducteur* et le circuit *induit*.

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 1 et 322.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1837, t. LXVI, p. 5; — 3e série, 1842, t. IV, p. 129. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLIII, p. 1115.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1840, t. LXXIV, p. 158.

(4) *Ann. de Poggendorff*, nouvelle série, 1834, t. XXI, p. 483; t. XXXIV, p. 385; t. XLVIII, p. 385.

(5) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1841, t. I, p. 385, et t. III, p. 5; — 1843, t. VII, p. 462.

(6) *Ibid.*, 3e série, 1841, t. III, p. 394.

(7) *Ibid.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 336. — *Archiv. de l'électricité*, 1842, t. IV, p. 336. — *Ibid.*, 1842, t. II, p. 290, 315, 338.

(8) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1844, t. X, p. 491, 498; — 1844, t. XI, p. 385, 395.

(9) *Ibid.*, 3e série, 1847, t. XIX, p. 257, 281, 385; — 1848, t. XXII, p. 5, et t. XXIV, p. 213.

(10) *Arch. de l'électricité*, 1845, t. V, p. 449.

(11) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1848, t. XXIV, p. 377; — 1850, t. XXIX, p. 501; — 1851, t. XXXI, p. 187.

(12) *Ibid.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 64; — 1853, t. XXXIX, p. 222; — 1855, t. XLIV, p. 343.

(13) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1854, t. XXXIX, p. 909, 1023.

(14) *Cours spécial sur l'induction*, etc. Paris, 1854.

Cette première loi établit une grande différence entre l'induction *électro-dynamique* et l'induction *électro-statique*.

2° Un circuit métallique traversé par un courant voltaïque, et un circuit *magnétique* soumis à l'influence d'un aimant, sont sujets à l'induction, comme s'ils étaient à l'état naturel.

3° Les actions inductrices exercées *simultanément* sur un même circuit restent *indépendantes* les unes des autres. Leurs effets s'*ajoutent* ou se *retranchent*, selon que les courants induits développés par ces actions sont de *même sens* ou de *sens contraires*.

4° Toutes choses égales d'ailleurs, les intensités des courants induits sont en *raison directe* de celles des courants inducteurs.

5° L'intensité d'un courant induit est en *raison directe* de la somme des forces électromotrices mises en jeu, c'est-à-dire de la somme des actions inductrices développées dans le circuit induit, et en *raison inverse* de la somme des résistances de son propre circuit.

La loi de Ohm relative aux courants voltaïques s'applique donc aussi aux courants induits.

6° La résistance totale du circuit induit, l'intensité du courant inducteur et la distance des deux circuits restant *constantes*, l'intensité du courant induit est *en raison directe* du produit des *longueurs* des portions des deux circuits qui réagissent l'une sur l'autre.

7° Lorsqu'une portion *rectiligne* du circuit inducteur est remplacée par une portion *sinueuse* du même circuit, de *même longueur en projection*, et placée à la même dis-

tance, l'action inductrice reste la même, et le courant induit conserve la même intensité.

8° Le courant induit conserve encore la même intensité, quand une substitution pareille est faite dans le circuit induit.

9° Lorsque les résistances des deux circuits, induit et inducteur, restent *invariables*, l'intensité du courant induit est complétement *indépendante* de la *nature* et de la *section transversale* des fils métalliques dont se composent les portions agissantes de ces deux circuits.

10° Dans le cas de deux anneaux, inducteur et induit, *égaux*, parallèles, et dont les centres sont placés sur une même normale à leurs plans, l'intensité du courant induit varie en *raison directe* du diamètre des anneaux, *pourvu que le rapport de la distance de ces anneaux à leur diamètre reste une quantité constante.* — L'action inductrice est donc en *raison inverse* de la *distance* des deux anneaux.

11° Un courant induit peut être développé dans un circuit métallique fermé, soit par un changement de position de ce circuit métallique par rapport à un circuit voltaïque ou par rapport à un aimant, soit par une variation d'intensité du courant voltaïque ou de l'aimant inducteur.

a. L'action inductrice *totale* développée et la *quantité* d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit *dépendent de l'étendue*, et restent *indépendantes de la vitesse* du mouvement relatif ou de la variation d'intensité.

b. L'*intensité* de la force électromotrice d'induction, ou la *tension* du courant induit, *dépend de la vitesse* du mouvement relatif ou de la variation d'intensité.

12° Soient *d*, *d'*, deux positions relatives que peuvent

prendre successivement un circuit voltaïque inducteur et un circuit métallique *fermé*. — En *d*, on peut rompre ou fermer le circuit voltaïque, sans développer aucun courant d'induction dans le circuit métallique. — *d'*, au contraire, est la position dans laquelle le courant voltaïque, au moment où il est rompu comme au moment où il est fermé, exerce une action inductrice *maximum* sur le circuit métallique. — Évidemment, si ces deux circuits, maintenus *fermés*, sont ramenés de l'une de ces deux positions à l'autre, le courant voltaïque, pendant toute la durée de ce mouvement relatif, exerce une action inductrice sur le circuit métallique fermé.

L'action inductrice *totale* développée et la *quantité totale* d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit, pendant que s'effectue ce mouvement relatif, ont les *mêmes valeurs* que si, les deux circuits étant maintenus dans la position *d'*, on avait *rompu* ou *fermé* le courant voltaïque inducteur.

Les lois précédentes s'appliquent aussi aux courants induits développés, dans les circuits métalliques fermés, par les décharges d'électricité statique.

Distribution des tensions dans un circuit induit. — Soit AB (Fig. 349) un fil métallique, homogène, de même diamètre dans toute sa longueur, rectiligne et faisant partie d'un circuit fermé invariable. Soumettons ce fil AB à l'action inductrice d'une longueur déterminée d'un circuit voltaïque traversé par un courant de force constante, et placé à une distance invariable. Nous savons que, dans ces circonstances, le circuit du fil AB est traversé par un courant *induit* de force *invariable* aussi. Sous l'influence

de l'induction, il se développe donc, en AB, une force électromotrice d'*intensité déterminée*, et disséminée dans toute la longueur du fil induit AB. Soit 20 l'intensité de cette force électromotrice. Les extrémités du fil AB, au moment où cette force électromotrice se développe, ont néces-

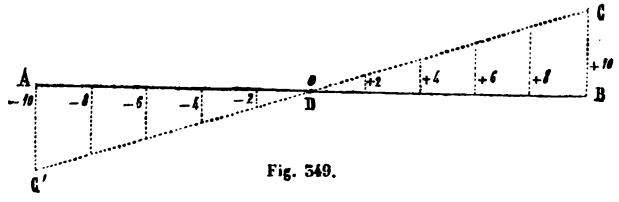


Fig. 349.

sairement des tensions égales et de signes contraires dont la *différence algébrique* est 20; l'une de ces extrémités B est à + 10, l'autre A est à — 10. Il y a donc nécessairement, entre les extrémités A, B, une région du fil dont la tension électrique est *nulle ;* et, comme la résistance du fil induit est uniforme dans toute son étendue, ce *point neutre* est, par raison de symétrie, en D, milieu de AB. L'état électrique du fil est *positif* dans toute la moitié DB, et *négatif* dans toute la moitié DA. D'ailleurs, puisque le changement de signe s'effectue en D, milieu de AB, deux points quelconques pris sur BD ont des tensions *positives*, dont les valeurs absolues sont *en raison directe* de leurs distances au point *milieu* D. — Deux points pris sur AD ont des tensions *négatives*, dont les valeurs absolues sont aussi *en raison* directe de leurs distances au point *milieu* D. — Enfin deux points pris sur AB, à droite et à gauche et à égale distance du milieu D, ont des tensions égales et de signes contraires.

Cela posé, aux extrémités B, A, élevons sur la droite AB deux perpendiculaires d'égale longueur, BC, AC′, dont la première représente la tension + 10 du point B, et la seconde la tension — 10 du point A. Une droite menée de C en C′ passe nécessairement par le point D, milieu de AB. Si nous partageons la droite AB en *dix éléments* de longueur égale, et si à chaque point de division nous élevons une perpendiculaire à la droite AB, les valeurs des tensions de ces divers points sont représentées par les longueurs des perpendiculaires correspondantes comprises entre les deux droites AB, CC′. Cette représentation graphique de la distribution des tensions dans le fil induit AB montre que :

1° La différence algébrique des tensions des extrémités d'un *élément* du fil induit est une quantité *constante* 2, complétement indépendante de la position de cet *élément*.

2° La force électromotrice totale développée dans le fil induit AB est la *somme* des forces électromotrices partielles, égales et de même sens, mises en jeu dans chacun des *éléments* dont le fil se compose.

3° Ce fil induit AB, composé de *dix* éléments d'égale longueur, peut être considéré indifféremment comme *un couple unique* dont la force électromotrice est 20, ou comme *une pile composée de dix couples égaux* ayant, chacun, une force électromotrice égale à 2.

Considérons maintenant une bobine induite M (Fig. 350), composée de *dix* tours de spire d'égale longueur. Sous l'influence de la bobine inductrice, il se développe, dans cette spirale M, une force électromotrice qui se dissémine dans toute la longueur du fil dont elle se compose:

Soit + 10 la tension de l'extrémité B, — 10 la tension de l'extrémité A, et par conséquent 20 l'intensité de la force électromotrice totale. Nous pouvons considérer chaque tour de spire comme un *élément* de la bobine totale M. Un raisonnement semblable au précédent prouve que les tensions doivent se distribuer entre les divers tours de spire, ainsi que l'indique la Figure 350. La force électromotrice totale de cette spirale induite est donc la somme des forces électromotrices partielles, égales et de même sens, développées dans chacun des tours de spire dont elle se compose. Par conséquent, cette spirale induite peut être indifféremment considérée comme un *couple unique*, ou comme une pile composée de couples égaux et en même nombre que ses tours de spire. Il est d'ailleurs facile de voir que, pour deux tours de spire successifs de la bobine induite, les états électriques relatifs sont les mêmes que pour deux couples contigus d'une pile hydro-électrique, ou d'une pile thermo-électrique.

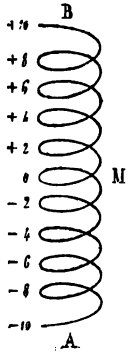


Fig. 350.

Intensité du courant induit. — Nous avons vu (page 235, proposition 5) que la loi de Ohm s'applique aux courants induits, et nous venons de voir que toute bobine induite peut et doit être assimilée à une pile dont les couples égaux sont représentés par les tours de spire successifs. Quelques mots suffiront pour montrer combien la similitude est complète entre ces deux genres d'électromoteurs. — Dans le circuit fermé d'une spirale induite,

la résistance totale se compose, comme dans une pile, de deux portions bien distinctes. Nous avons, d'une part, la résistance de la portion du circuit comprise entre les extrémités de la bobine, qui est l'analogue de celle de l'arc interpolaire de la pile ; nous avons, d'autre part, la résistance de la bobine elle-même, qui dépend à la fois de la longueur, de la section et de la nature du fil employé, est égale à la somme des résistances des tours de spire de la bobine, et joue le même rôle que la résistance de la pile. — Nous savons, d'ailleurs, que, pour une spirale inductrice traversée par un courant inducteur de force constante et maintenue à une distance invariable, la force électromotrice de la spirale induite ne dépend que de la longueur des fils employés, et est égale à la somme des forces électromotrices, partielles et de même sens, développées dans chacun des tours de spire. — L'intensité du courant fourni par une spirale induite peut donc être représentée par les formules très simples qui nous ont servi (page 64 et suivantes) dans l'étude des intensités des courants hydro-électriques et thermo-électriques. La discussion serait la même, elle conduit aux conclusions suivantes :

1° Une spirale induite dont le fil *n'est pas très long* doit être assimilée à une pile thermo-électrique, sa force électromotrice et sa résistance sont faibles. Pour étudier le courant d'une semblable spirale, il faut employer un galvanomètre à fil *gros* et *court* ; un galvanomètre à fil *long* et *fin* augmenterait trop la résistance du circuit interpolaire, et diminuerait trop l'intensité du courant induit.

2° Une spirale induite composée d'un fil *très fin* et *ex-*

trêmement long peut produire des effets électrolytiques et lumineux comme une très puissante pile hydro-électrique ; sa force électromotrice et sa résistance sont considérables. Quoique les liquides et les couches d'air opposent une grande résistance au passage du courant induit, cependant cette résistance est faible en comparaison de celle de la spirale, et le courant induit conserve assez d'intensité pour que son passage s'accompagne d'actions très énergiques.

ARTICLE III.

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION DANS LES MASSES MÉTALLIQUES EN MOUVEMENT.

C'est encore à M. Faraday qu'est due la découverte des phénomènes d'induction qui se développent dans les masses métalliques mises en mouvement en présence des pôles d'un barreau aimanté, d'un électro-aimant, ou d'un simple solénoïde.

§ Ier. — Plaques métalliques rectangulaires glissant parallèlement à leurs faces.

A (Fig. 351) est le pôle austral d'un barreau aimanté, d'un électro-aimant ou d'un solénoïde placé *au-dessous* d'une plaque métallique MN. E, C, H, D, sont de petits cylindres métalliques excavés à une de leurs extrémités, de manière à embrasser les bords de la plaque. Les extrémités de ces cylindres appliquées contre la plaque, et les bords de la plaque elle-même, sont amalgamés pour rendre le

contact plus intime; les extrémités libres des cylindres sont destinées à être mises, pendant les expériences, en communication avec le fil d'un galvanomètre.

La plaque glisse dans le sens de sa longueur. — Dans ce cas, on fixe les cylindres E, H, de manière qu'ils

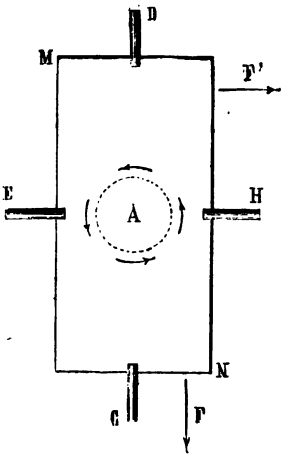


Fig. 351.

ne suivent pas les mouvements de la plaque et restent toujours sur le même diamètre de la surface polaire A. Les cylindres C, D, suivent le mouvement de la plaque MN. Pendant le glissement, les diverses sections transversales de la lame passent successivement *au-dessus* du pôle, et par les deux cylindres E, H.

1° Le mouvement s'exécute *dans le sens* de la flèche F. — Alors, si le galvanomètre communique avec les cylindres E, H, au moment où le glissement commence et tant qu'il

dure, l'aiguille aimantée accuse la présence d'un courant induit dirigé, dans la plaque, de H en E.

2° Le mouvement s'exécute en *sens inverse* de la flèche F. — Alors, si le galvanomètre communique avec les cylindres E, H, on constate dans la plaque la présence d'un courant induit, mais dirigé de E en H. — Dans l'un comme dans l'autre cas, l'aiguille du galvanomètre n'est pas influencée, si les extrémités du fil sont mises en communication avec les cylindres C, D.

La plaque glisse dans le sens de sa largeur. — Dans ce cas (Fig. 352), on fixe les cylindres C, D, et on laisse les

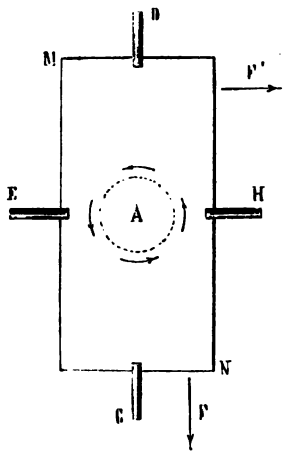


Fig. 352.

cylindres E, H, libres de suivre le mouvement de la plaque. Pendant le glissement, les diverses sections longitudinales de la plaque passent successivement *au-dessus* du pôle, et par les deux cylindres C, D.

1° Le mouvement s'exécute *dans le sens* de la flèche F'. — Alors, si le galvanomètre communique avec les cylindres C, D, au moment où le glissement commence et tant qu'il dure, l'aiguille aimantée accuse la présence d'un courant induit dirigé, dans la plaque, de D en C.

2° Le mouvement s'exécute en *sens inverse* de la flèche F'. — Alors, si le galvanomètre communique avec les cylindres C, D, on constate dans la plaque la présence d'un courant induit, mais dirigé de C en D. — Dans l'un comme dans l'autre cas, l'aiguille du galvanomètre n'est pas influencée si les extrémités du fil communiquent avec les cylindres E, H.

Quand les mouvements sont exécutés en face d'un pôle boréal placé *au-dessous* de la plaque, on observe des phénomènes d'induction de même nature; seulement les courants marchent en sens inverse de ceux que nous avons obtenus avec le pôle austral.

Il est évident aussi que, pour renverser les courants d'induction, il suffirait de faire passer le pôle austral de la face inférieure à la face supérieure de la plaque.

Il est encore évident que, si la plaque glissait entre deux pôles de noms contraires, les actions inductrices des deux pôles agiraient dans le même sens, et, par suite, les courants induits développés seraient plus intenses que dans le cas où la plaque se meut en présence d'un seul pôle.

Ces résultats de l'expérience directe nous conduisent à poser comme démontrés les deux principes suivants :

a. Lorsqu'une plaque métallique glisse parallèlement à ses faces, en présence d'un pôle magnétique ou entre deux pôles de noms contraires, chaque portion de la

plaque, tant qu'elle est comprise dans l'espace correspondant aux faces polaires, est traversée par un courant induit dont la direction est perpendiculaire au sens du mouvement général. Dans tous les cas, d'ailleurs, le sens des courants induits est conforme aux indications de la loi de Lenz.

b. Chaque section de la plaque perpendiculaire à la direction du mouvement se conduit comme un simple fil métallique mis en mouvement en face d'un pôle magnétique (page 207). Cette assimilation permet de déterminer, dans chaque cas, le sens du courant induit.

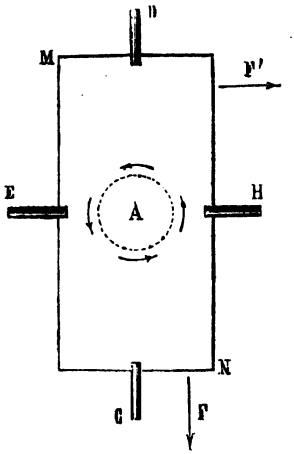


Fig. 353.

Reprenons la plaque MN (Fig. 353), et faisons-la glisser *dans le sens* de la flèche F. — Mettons le galvanomètre en communication d'une part avec le cylindre H, et d'autre part avec le cylindre C; dans ce cas, le courant induit est

dirigé de telle façon qu'il entre par le cylindre C dans le fil du galvanomètre. — Si nous maintenons la communication en H, et si nous fixons l'autre extrémité du fil du galvanomètre au cylindre D, l'aiguille est encore déviée; le courant induit part toujours de H, et, par conséquent, entre par l'extrémité D dans le circuit du galvanomètre.

Cette direction du courant induit indique que, les portions de la plaque situées en dehors de la surface polaire étant moins fortement influencées que les portions correspondantes à cette surface, le courant induit développé dans les sections qui passent sur le pôle peut se décharger, à droite et à gauche, à travers les parties de la plaque qui s'approchent et qui s'éloignent de ce pôle.

Il résulte de cette considération que, lorsqu'une plaque métallique MN (Fig. 354) glisse dans le sens de la flèche F, en face d'un pôle magnétique, ou entre deux pôles de noms contraires, elle est traversée par deux courants fermés qui parcourent, *dans le même sens*, une portion de la ligne *ab*, sur laquelle se projette le diamètre de la surface polaire perpendiculaire à la direction du mouvement général. Le cercle central représente la position et la nature du pôle magnétique situé *au-dessous* de la plaque, les deux courbes latérales indiquent le sens des courants induits, et la flèche F montre le sens du mouvement général de la plaque.

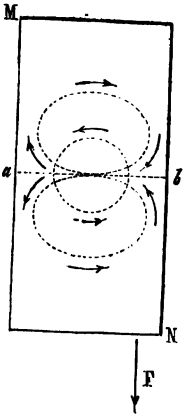


Fig. 354.

Nous avons dit et la Figure 354 indique que la ligne sur

laquelle les deux courants induits se confondent coïncide avec un diamètre de la surface polaire. Nous verrons plus tard qu'en raison du temps nécessaire pour que l'induction se développe, cette ligne *de plus grande action* est réellement située *en avant* du centre de la surface polaire, dans le sens du mouvement général de la plaque.

§ II. — Plaques métalliques circulaires tournant autour de leur centre.

Perpendiculairement à la face *inférieure* d'un disque métallique horizontal, présentons (Fig. 355) le pôle austral *a* d'un barreau aimanté, d'un électro-aimant, ou d'un simple solénoïde. E, D, H, sont de petits cylindres métalliques dont une extrémité est creusée de manière à embrasser les bords du disque, et dont l'autre extrémité est destinée à être mise en communication avec le fil d'un galvanomètre. Le disque peut, d'ailleurs, tourner dans un plan horizontal autour d'un axe C passant par son centre et perpendiculaire à ses faces.

1° La rotation du disque s'effectue dans le sens des flèches *f, f.* — Si le galvanomètre communique d'une part avec l'axe C, et d'autre part avec le cylindre E, la déviation de l'aiguille indique que la plaque est traversée par un courant dirigé de E en C, ou de la circonférence au centre. Le courant induit est *plus faible* mais de *même sens*, si, la communication du galvanomètre avec l'axe C étant maintenue, l'autre extrémité du fil touche le cylindre D, ou le cylindre H.

Lorsque le galvanomètre est mis en communication

avec les deux cylindres des bords E, D, l'aiguille est encore déviée dans un sens tel, qu'elle accuse une prédominance du courant dirigé de E vers le centre sur le courant dirigé de D vers ce même centre. Les choses se passent de même, si le galvanomètre communique avec les deux

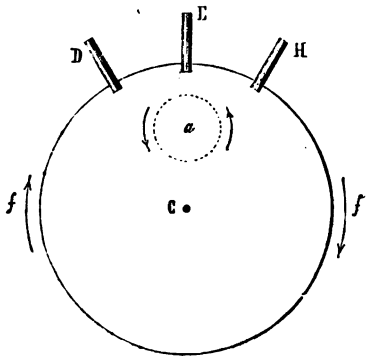


Fig. 355.

cylindres E, H. Mais, si le galvanomètre communique avec les deux cylindres D, H, placés à égale distance du diamètre passant par le pôle, l'aiguille n'est pas influencée; ce résultat prouve que les deux courants induits dirigés de D et de H vers le centre du disque sont de *même intensité*, puisqu'ils se neutralisent complétement.

2° **La rotation du disque s'effectue en sens inverse des flèches** *f*, *f*. — Dans ce cas, les phénomènes sont les mêmes, seulement les courants induits changent de sens comme la rotation du disque, et sont tous dirigés du centre à la circonférence.

Il est d'ailleurs facile de voir que tous ces résultats des

expériences directes de M. Faraday s'accordent parfaitement avec les indications de la loi de Lenz (page 168).

Par raison de symétrie, un pôle boréal placé *au-dessus* du disque doit produire le même effet qu'un pôle austral placé *au-dessous;* ou encore, un pôle boréal placé *au-dessous* du disque doit produire le même effet qu'un pôle austral placé *au-dessus*. Les résultats de l'expérience directe s'accordent complétement avec ces prévisions de la théorie.

Ces faits nous permettent d'établir les deux principes suivants :

a. Toutes les fois qu'un disque métallique tourne sur son centre, en face d'un pôle magnétique situé entre la circonférence et le centre du disque, l'induction développe dans ce disque des courants dirigés suivant ses rayons, ou perpendiculairement à la direction de la rotation.

b. Le sens de ces courants induits change avec la nature et la position du pôle magnétique, et aussi avec le sens de la rotation du disque; mais le sens des courants est toujours conforme aux indications de la loi de Lenz, ou à ce que nous avons dit (page 208) d'un simple fil tournant en face des pôles d'un aimant. D'ailleurs, dans chaque cas, les courants sont de même sens dans les rayons du disque qui s'approchent du pôle magnétique, dans ceux qui s'en éloignent, et dans ceux qui traversent la surface polaire elle-même.

c. Les courants induits les plus intenses correspondent aux rayons du disque qui se trouvent dans le voisinage du centre de la surface polaire. A partir de cette situation, ils diminuent graduellement et également à droite et à

gauche, à mesure qu'on s'éloigne du pôle magnétique.

Les principes précédents nous permettent de nous rendre compte de ce qui se passe dans deux cas assez importants pour être considérés à part.

1° Le disque tourne autour de l'axe C (Fig. 356) entre les pôles de noms contraires d'un fort électro-aimant,

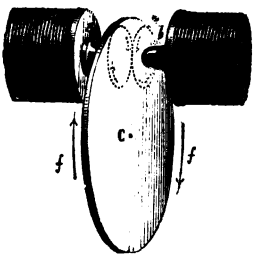


Fig. 356.

et dans le sens des flèches *f*, *f*. Le pôle austral *a* et le pôle boréal *b* exercent nécessairement sur le disque des actions inductrices de même sens. Dès lors, les portions du disque qui s'approchent des pôles, celles qui s'en éloignent, et celles qui passent entre les deux surfaces polaires, sont traversées par des courants induits dirigés de la circonférence au centre. Mais, comme les courants induits sont plus intenses dans les portions situées au voisinage du centre des surfaces polaires que partout ailleurs, ces courants induits se déchargent en avant et en arrière des surfaces polaires, et dessinent sur le disque deux systèmes de courbes fermées qui se confondent dans le voisinage des points correspondants aux centres de ces surfaces polaires. Les courbes ponctuées indiquent le traje-

et les flèches indiquent le sens de ces deux systèmes de courants induits. Si, d'ailleurs, la rotation du disque changeait de sens, les deux systèmes de courants induits conserveraient la même position ; seulement les courants marcheraient en sens inverse.

2° Au-dessus d'un disque métallique horizontal, mobile autour d'un axe vertical (Fig. 357), suspendons un fort barreau aimanté, de manière que son point de suspen-

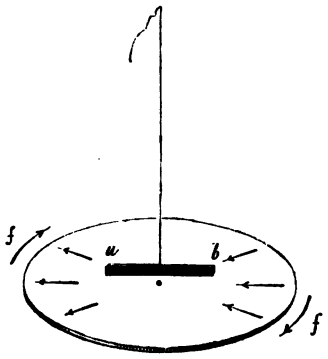


Fig. 357.

sion se projette sur le centre de rotation, et que le barreau soit très rapproché du disque. Imprimons au disque un mouvement de rotation dans le sens des flèches extérieures *f*, *f* ; immédiatement les portions du disque situées dans le voisinage des pôles sont traversées par des courants induits dirigés suivant ses rayons. Mais, puisque le barreau est au-dessus du disque, d'après ce que nous savons déjà, les courants induits développés dans le voisinage du pôle austral *a* marchent tous du centre à la cir-

conférence, et les courants induits développés autour du pôle boréal *b* marchent de la circonférence au centre. Ces deux systèmes de courants induits sont donc concordants et tendent à parcourir les diamètres du disque, de la circonférence au centre dans le demi-cercle correspondant au pôle boréal *b*, et du centre à la circonférence dans le demi-cercle correspondant au pôle austral *a* du barreau.

Mais, comme les parties situées en avant et en arrière des pôles sont moins fortement influencées que les portions placées immédiatement sous les pôles du barreau,

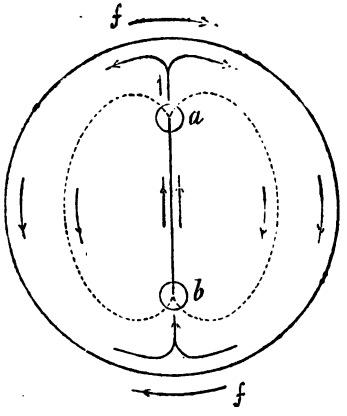


Fig. 358.

les courants induits suivant le diamètre des pôles se déchargent, à droite et à gauche, à travers le disque tournant, et dessinent des courbes fermées. Si *a* et *b* (Fig. 358) représentent les projections des pôles sur la face supérieure d'un disque tournant dans la direction des flèches extérieures *f*, *f*,

les courbes et les flèches tracées sur la face du plateau indiquent le trajet et le sens des courants induits.

Si la rotation du plateau changeait de sens, les deux systèmes de courants induits conserveraient la même position, seulement les courants marcheraient dans un sens inverse de celui qu'indique la Figure 358.

Ligne de plus grande action. — La ligne suivant laquelle les deux systèmes de courants se confondent est évidemment la direction dans laquelle les courants induits acquièrent leur *maximum* d'intensité. La Figure 358 indique que cette ligne de *plus grande action* coïncide avec le diamètre du disque immédiatement placé au-dessous des centres des pôles du barreau. Ce n'est réellement pas ainsi que les choses se passent. M. Faraday avait déjà fait observer qu'il faut un certain temps pour que l'induction se développe. M. Verdet (1), dans un beau travail sur les phénomènes qui nous occupent, a démontré l'existence et étudié les effets de cette influence du temps sur l'induction. Ce n'est donc pas au moment même où il passe sous les pôles, mais seulement un instant *après*, qu'un élément du disque éprouve le *maximum* d'influence. Il en résulte que la ligne *cd* de *plus grande action* (Fig. 359), quoique passant toujours par le centre du disque, se déplace dans le sens du mouvement de rotation, et fait, avec le diamètre des pôles *ab*, un angle d'autant plus grand que la vitesse du disque est plus considérable. Cette dernière considération est d'une très haute importance dans l'explication des phénomènes du magnétisme de rotation.

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1851, t. XXXI, p. 187.

Tous ces phénomènes varient singulièrement d'intensité avec la *nature* des masses métalliques mises en mouvement en face des pôles magnétiques. — Avec des plaques

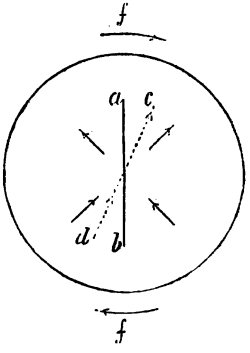


Fig. 359.

de cuivre ou d'argent, on obtient des effets plus marqués qu'avec les autres métaux ; toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des courants induits est proportionnelle à la conductibilité du métal soumis à l'action inductrice.

§ III. — Magnétisme de rotation.

En 1824, Arago (1) découvrit le magnétisme de rotation, MM. Babbage, Herschell, Christie, Barlow et Marsh (2) s'empressèrent de répéter les expériences du physicien français ; plus tard, M. Harris (3) publia ses recherches sur le même sujet.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1824, t. XXVII, p. 363 ; — 1825, t. XXVIII, p. 325 ; — 1826, t. XXXII, p. 213.

(2) *Biblioth. univers. de Genève*, 1825, t. XXIX, p. 254.

(3) *Ibid*, 1831, t. XLVII, p. 134.

Arago, en étudiant les mouvements d'une aiguille aimantée suspendue au-dessus d'un disque de cuivre rouge, observa que les oscillations diminuaient rapidement d'amplitude, et s'éteignaient en très peu de temps. L'aiguille semblait se mouvoir avec difficulté. Du reste, l'amplitude seule des oscillations était altérée; leur durée restait la même. Il fit varier la *nature* du disque placé au-dessous de l'aiguille, et la distance du disque fixe à l'aiguille mobile; il vit alors que les métaux exerçaient, sur le mouvement oscillatoire de l'aiguille, une influence beaucoup plus considérable que tous les autres corps; il vit aussi que l'intensité de l'effet diminuait rapidement quand la distance augmentait.

Puisqu'un disque fixe de cuivre opposait une certaine résistance au mouvement de l'aiguille, il était naturel de penser qu'il suffirait de faire tourner un disque métallique au-dessous et dans le voisinage d'une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité, pour que cette aiguille fût *entraînée* dans le sens de la rotation du disque. Arago vérifia expérimentalement l'exactitude de cette proposition.

Dans une caisse de bois NN (Fig. 360), on place un disque de cuivre horizontal DD qu'on peut faire tourner autour d'un axe vertical E, au moyen d'une manivelle M et d'une roue d'engrenage. La boîte est fermée à sa partie supérieure par une membrane tendue *cc*. Cette membrane sert à supporter le pivot d'une aiguille de déclinaison *ab*, et à mettre l'aiguille à l'abri de l'agitation causée dans l'air par le mouvement du disque DD. Au moment où le disque entre en rotation, l'aiguille est déviée de sa position d'équi-

libre dans le sens du mouvement ; l'angle d'écartement augmente avec la vitesse. Si l'aiguille est très rapprochée, on peut imprimer au disque une vitesse suffisante, pour

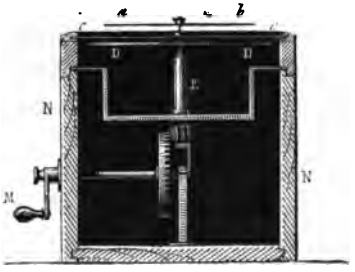


Fig. 360.

entraîner complétement l'aiguille, et lui communiquer un mouvement de rotation autour de son pivot comme axe.

Toutes choses égales d'ailleurs, le pouvoir d'entraînement du disque est d'autant plus considérable que la conductibilité du métal est plus grande. A mesure que la distance de l'aiguille au plateau augmente, le pouvoir d'entraînement décroît très rapidement.

Les disques fendus suivant des rayons (Fig. 361) ont

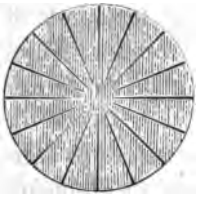


Fig. 361.

un pouvoir d'entraînement très faible, par rapport aux disques qui n'ont éprouvé aucune solution de continuité.

On rend à ces disques presque tout leur pouvoir, en réunissant par des soudures les divers secteurs en lesquels ils ont été découpés.

A tous ces faits, Ampère ajouta une observation d'une grande importance. Au-dessus d'un disque de cuivre il suspendit un solénoïde, et le cylindre électro-dynamique fut, comme l'aiguille aimantée, *entraîné* dans le sens de la rotation du disque métallique.

Enfin Arago prouva que l'action du disque tournant sur l'aiguille aimantée peut être décomposée en trois forces : la première est horizontale et perpendiculaire au plan vertical qui contient le rayon aboutissant à la projection du pôle de l'aiguille; la seconde est perpendiculaire au plan du disque; la troisième est dirigée suivant le rayon qui correspond à l'axe de l'aiguille.

La première de ces forces agit tangentiellement, et donne aux aiguilles horizontales le mouvement de rotation; son existence est suffisamment prouvée par les expériences précédentes.

Un barreau aimanté, vertical, suspendu au fléau d'une balance et équilibré, sert à mettre en évidence l'action de la seconde composante. Dès que le disque entre en rotation *au-dessous* du barreau, l'équilibre est *rompu;* le barreau semble avoir *perdu de son poids*, le plateau le *repousse.*

Pour constater l'existence de la troisième composante, il faut placer au-dessus du disque métallique une aiguille d'inclinaison dans un azimut tel que son axe soit vertical. Si l'aiguille est au-dessus du centre de rotation, elle n'est nullement influencée, et reste verticale. Il existe un second

point, *plus voisin du bord que du centre*, au-dessus duquel la verticalité de l'aiguille se conserve aussi. Entre ce point *neutre* et le centre, le pôle inférieur est repoussé vers le centre. Entre ce point *neutre* et le bord, le pôle inférieur est repoussé vers la circonférence du disque.

Explication du magnétisme de rotation. — Ces phénomènes reçurent dès l'origine, et ont conservé depuis la dénomination impropre de magnétisme de rotation. Nous ne dirons rien des diverses théories qui furent proposées pour les expliquer. L'entraînement de l'aiguille aimantée par le disque tournant est évidemment un effet direct des courants induits qui, dans cette circonstance, se développent dans la masse métallique qui se meut en présence des pôles magnétiques. Dans son mémoire déjà si souvent cité, et dans sa lettre à Gay-Lussac (1), M. Faraday a montré comment les trois forces composantes déterminées par Arago résultent de la distribution des courants induits à la surface du disque tournant.

Soit *ab* (Fig. 362) l'aiguille aimantée placée au-dessus d'un disque de cuivre tournant dans le sens des flèches *f*, *f*. Nous savons que les courants induits marchent du centre à la circonférence autour du pôle austral *a*, et de la circonférence au centre autour du pôle boréal *b*. D'ailleurs, ces courants passent tous au-dessous de l'aiguille. Les premiers, autour du pôle austral, tendent à repousser ce pôle vers leur *gauche*, les seconds tendent à repousser le pôle boréal vers leur *droite;* l'aiguille est donc soumise à l'action de deux forces qui la sollicitent à

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1832, t. LI, p. 404.

tourner sur son centre, dans le sens du mouvement du disque. Nous savons, en outre, que la ligne *cd* de *plus forte induction*, ou de *plus grande action*, ne coïncide pas avec l'axe de l'aiguille *ab*, mais est placée un peu en avant

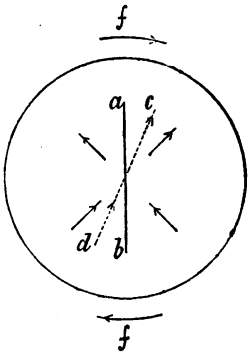


Fig. 362.

de cet axe dans le sens du mouvement. La résultante de l'action des courants induits sur chacun des pôles n'est donc pas horizontale, mais inclinée sur la surface du disque. Cette résultante peut donc être décomposée en deux forces, l'une *parallèle*, l'autre *perpendiculaire* au plan du disque tournant. La première est une force *tangentielle;* c'est la première composante d'Arago, qui donne le mouvement de rotation à l'aiguille. La seconde force est verticale et *repousse* de bas en haut le pôle correspondant; c'est la seconde composante d'Arago.

Par des considérations du même genre, M. Faraday, à la fin de sa lettre à Gay-Lussac, explique comment Arago, en agissant avec une aiguille d'inclinaison verticale, a dû

trouver sa troisième composante parallèle au rayon du disque tournant. Il montre comment cette composante doit être nulle au centre, et dans un certain point situé plus près du bord que du centre et qu'on peut appeler *point neutre ;* il montre enfin pourquoi cette composante est tantôt dirigée vers le centre, tantôt dirigée vers le bord, suivant que le pôle inférieur de l'aiguille d'inclinaison est placé entre ce *point neutre* et le centre, ou entre ce *point neutre* et la circonférence du disque.

Il reste donc ainsi bien démontré que le magnétisme de rotation découvert par Arago, n'est qu'une des nombreuses manifestations des courants induits développés dans les plaques conductrices mises en mouvement, en présence des pôles des barreaux aimantés, des électro-aimants ou des solénoïdes.

§ IV. — Influence des courants induits sur les mouvements des masses métalliques.

Pour terminer tout ce qui est relatif aux courants d'induction développés dans des conducteurs solides, nous devons parler de quelques phénomènes curieux dont l'explication découle naturellement des principes développés dans les pages précédentes.

Au fléau d'une balance et au-dessus de la surface polaire horizontale d'un fort électro-aimant, on suspend un cube métallique que l'on équilibre avant de faire passer le courant. — Au moment où le circuit des bobines est fermé, le cube est vivement *repoussé ;* au moment où le circuit est ouvert, le cube est vivement *attiré*. — Ces effets

sont dus au développement de courants induits horizontaux dans la masse métallique; ces courants sont, par rapport à ceux de la surface polaire correspondante, *inverses*, ou *répulsifs*, au moment où le circuit des bobines est *fermé*, *directs*, ou *attractifs*, au moment où il est *rompu*.

Des courants induits se développent aussi dans la face inférieure du cube lorsque l'on en *approche*, ou que l'on en *éloigne* rapidement un fort barreau aimanté. Conformément à la loi de Lenz, le sens de ces courants induits est toujours tel que le cube est *repoussé* et que son poids *paraît diminué* pendant que le barreau se *rapproche;* tandis que, pendant que le barreau s'*éloigne*, le cube est *attiré* et son poids *paraît augmenté*.

Les phénomènes d'induction rendent compte d'un fait très intéressant observé, pour la première fois, par M. Faraday, et que M. Matteucci a étudié de nouveau dans son cours spécial sur l'induction.

Entre les surfaces polaires opposées d'un fort électro-aimant (Fig. 363), suspendons un cube de cuivre C. Avant de fermer le circuit des bobines, faisons tourner le cube sur lui-même de manière à tordre fortement le fil suspenseur. Quand, ensuite, le cube est abandonné à lui-même, le fil tend à se détordre et, si le circuit des bobines reste *ouvert*, le cube tourne rapidement autour de son axe vertical de suspension.

Mais, au moment où l'on *ferme* le circuit des bobines, le mouvement de rotation du cube, quoique très rapide, s'*arrête brusquement;* tant que le circuit des bobines reste fermé, l'action de la force de torsion du fil suspenseur est complétement détruite, et le cube C reste en équilibre.

Cet arrêt brusque du cube C est évidemment dû à l'action réciproque des pôles de l'électro-aimant et des courants induits, qui se développent dans les tranches verticales de la masse métallique, quand elle *tourne* ou *tend à tourner* entre les pôles magnétiques.

Quand le circuit des bobines est *rompu*, le mouvement de rotation du cube C recommence, pour s'arrêter de nouveau au moment où le circuit est de nouveau *fermé*.

Pour mettre en évidence le rôle des courants induits dans ces phénomènes, remplaçons le cube C par le croissant métallique C′ (Fig. 364). — Si les extrémités libres

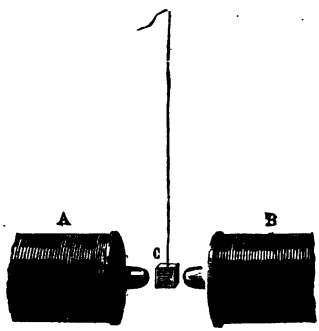


Fig. 363.

Fig. 364.

du croissant sont réunies par un conducteur quelconque, le corps suspendu représente un anneau vertical complet, et se conduit comme le cube C ; il suffit de *fermer* ou de *rompre* successivement le circuit des bobines, pour que son mouvement de rotation s'*arrête* ou *continue*. — Si les extrémités libres du croissant restent isolées ou sont réunies par un mauvais conducteur, le corps C′ représente un anneau *incomplet* dans lequel, par conséquent, les cou-

rants induits ne peuvent pas circuler. Aussi, dans ce cas, que le circuit des bobines soit *ouvert* ou *fermé*, le croissant C' abandonné à lui-même tourne sous l'influence de la force de torsion du fil suspenseur, et son mouvement n'est nullement influencé par la présence des pôles de l'électro-aimant.

Ainsi donc, conformément aux indications de la loi de Lenz, l'expérience démontre que, si une masse métallique se meut en présence d'un courant ou d'un aimant, et si ce mouvement est de nature à développer des effets d'induction, le sens du courant induit dans la masse mobile est tel, que sa réaction électro-dynamique sur le courant ou sur l'aimant inducteur s'*oppose* au mouvement qui produit l'induction. Dans ce cas, la réaction électro-dynamiqne doit être assimilée à une véritable résistance qui ralentit et tend à anéantir le mouvement de déplacement relatif du corps induit et du corps inducteur.

Chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement. — Dans les premières pages de leur beau Mémoire (1), Lavoisier et Laplace passent en revue les opinions des physiciens sur la nature de la chaleur; cette introduction, si fortement pensée, si fortement écrite, se recommande d'une manière toute spéciale à notre attention, en ce qu'elle contient une très remarquable exposition de la *théorie mécanique* de la chaleur. Ne voir dans la chaleur qu'un mode de manifestation du principe dynamique, c'était admettre que, selon les circonstances au milieu desquelles elle entre en action, une

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*. Paris, 1780, p. 357.

force motrice peut développer une vitesse, élever un poids, ou déterminer une élévation de température, c'est-à-dire produire une force vive, un travail, ou une quantité de chaleur. Longtemps oubliée ou considérée comme une vaine hypothèse, cette théorie a été reprise dans ces dernières années en Allemagne, en Angleterre et en France, et soumise à une étude très approfondie. Aujourd'hui les méthodes d'observation les plus rigoureuses ont parlé, l'équivalent mécanique de la chaleur est connu, la transformation de la force motrice en chaleur est un fait physique démontré. Les expériences et les mesures de M. Joule et de M. V. Regnault ont établi d'une manière incontestable que, toutes les fois qu'une force motrice se dépense sans produire un effet mécanique, elle donne de la chaleur en quantité invariable et indépendante du mode de transformation.

M. Léon Foucault (1) a profité de l'influence qu'un aimant exerce sur les mouvements d'un corps conducteur voisin, pour donner une très belle démonstration de cette conversion du travail mécanique en chaleur. Après avoir rappelé qu'un aimant fixe et un corps conducteur en mouvement réagissent l'un sur l'autre de manière à tendre vers le repos relatif, il ajoute :

« Si, malgré cette influence, on veut que le mouvement » persiste, il faut *fournir nécessairement un certain travail;* » la partie mobile semble être pressée par un frein, et ce » travail produit nécessairement *un effet dynamique* que » j'ai jugé, suivant les nouvelles doctrines, devoir se re» trouver en *chaleur*. »

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1855, t. XLI, p. 450.

Entre les pôles d'un fort électro-aimant horizontal, M. L. Foucault engage un disque de *cuivre* vertical, mobile autour d'un axe horizontal. Ce disque de cuivre, mis en mouvement au moyen d'une manivelle et d'un rouage, peut prendre une vitesse de 150 à 200 tours par *seconde*. Pour rendre plus efficace l'action de l'électro-aimant, M. L. Foucault a soin de surajouter aux bobines deux pièces de fer doux, qui prolongent les pôles magnétiques et les concentrent au voisinage du corps tournant.

Quand le disque est lancé à toute vitesse et abandonné à lui-même, il suffit de fermer le circuit des bobines de l'électro-aimant pour que le mouvement de rotation s'arrête complétement en *quelques secondes*, « comme si un *frein* » *invisible* était appliqué au mobile.

» Mais si, le circuit des bobines étant maintenu fermé, » on pousse à la manivelle pour restituer à l'appareil le » mouvement qu'il a perdu, la résistance qu'on éprouve » oblige à fournir un certain travail dont l'*équivalent* re- » paraît et s'accumule en chaleur à l'intérieur du corps » tournant.

» Au moyen d'un thermomètre qui plonge dans la » masse du disque, on suit pas à pas l'élévation progres- » sive de la température. »

Avec un disque de *cuivre* de *huit* centimètres de diamètre et de *sept* millimètres d'épaisseur, engagé, autant que le permettent les montures, entre les pôles d'un électro-aimant dont les bobines sont en communication avec une pile de *six* couples de Bunsen, la résistance au mouvement est très puissante; il faut dépenser beaucoup de force pour entretenir la rotation

du disque. Malgré la déperdition considérable causée par le rayonnement et par le contact de l'air, la température du disque s'élève d'environ *soixante* degrés au-dessus de celle du milieu ambiant, quand le mouvement de rotation est entretenu pendant *deux minutes*.

Sans doute, tant que le mouvement de rotation est entretenu, il se développe dans le disque des courants induits qui peuvent être considérés comme la cause immédiate de son échauffement. Mais il doit toujours exister, entre l'intensité de ces courants induits et la force motrice dépensée, une relation telle que la quantité de chaleur produite par ces courants soit l'équivalent du travail mécanique fourni pour les développer, ou pour surmonter la résistance qu'éprouve le disque de cuivre. Nous verrons, dans le chapitre VII, comment M. Favre a démontré que, réciproquement, quand un courant produit un travail mécanique hors de son circuit, la chaleur développée par ce courant dans son propre circuit diminue d'une quantité qui est l'équivalent de ce travail extérieur.

M. L. Foucault a donné une forme différente et très intéressante à sa belle expérience du disque tournant. Avant de fermer le circuit de la pile, il engage le disque entre les branches de l'électro-aimant et lui communique une certaine vitesse de rotation; puis il l'abandonne à lui-même avec sa vitesse acquise, et ferme le circuit voltaïque. Le disque s'arrête très rapidement, et sa température s'élève. M. L. Foucault a constaté, par des mesures directes, que l'élévation de température du disque est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Ainsi, quand un disque tournant abandonné à lui-même s'ar-

rête sous l'influence des pôles d'un aimant, il y a dégagement d'une quantité de chaleur proportionnelle à la force vive perdue.

Il serait difficile d'imaginer une démonstration à la fois plus élégante et plus nette de la conversion de la force motrice en chaleur.

ARTICLE IV.

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION DANS LES LIQUIDES.

Des expériences récentes de M. Faraday prouvent que, sous l'influence d'un électro-aimant puissant, des courants d'induction peuvent être développés dans les liquides conducteurs. Nous rapportons ici textuellement l'extrait du travail de M. Faraday, tel qu'il a été donné par M. Verdet (1).

« On a pris un puissant électro-aimant en fer à cheval, » dont les branches étaient terminées par deux surfaces » horizontales, chacune d'environ 14 centimètres carrés, » séparées par un intervalle de 9 centimètres. On a posé » sur ces deux surfaces un barreau de fer doux de 12 cen- » timètres de longueur sur 43 millimètres de diamètre, » autour duquel on a enroulé en hélice un tube de caout- » chouc vulcanisé, de 6 millimètres de diamètre intérieur, » 12 millimètres de diamètre extérieur et $2^{m},60$ de lon- » gueur; on s'est arrangé de manière qu'il y eût à » chaque extrémité de l'hélice un bout de tube libre d'à

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1854, t. XLI, p. 196.

» peu près 30 centimètres de longueur. On a rempli ce » tube, par aspiration, avec de l'acide sulfurique étendu, » et l'on a introduit dans les deux bouts non enroulés les » extrémités de deux gros fils de cuivre communiquant » avec un galvanomètre de 300 tours, placé à 6 mètres de » distance de l'aimant. On a attendu que le courant pro- » duit par l'hétérogénéité des fils de cuivre eût entière- » ment disparu, et l'on a magnétisé l'électro-aimant par » l'action d'un courant d'une pile de 20 éléments de Grove. » On a obtenu un *faible courant d'induction*, qui a fait » dévier l'aiguille d'environ 2 degrés. Pour ne pas con- » fondre l'effet dû à ce courant avec l'effet dû à l'action » directe de l'électro-aimant sur l'aiguille galvanomé- » trique, on a arrangé les communications de manière » que ces deux effets fussent contraires.

» Dans une seconde expérience, on a remplacé l'acide » étendu par de l'eau distillée. Le courant induit n'a pas » été appréciable, par suite de la mauvaise conductibilité » du liquide. »

ARTICLE V.

ÉLECTROMOTEURS FONDÉS SUR L'INDUCTION.

Ces appareils sont extrêmement nombreux; nous ne dirons rien ici de ceux qui sont plus spécialement destinés aux applications électro-médicales, nous réservant d'en faire une étude complète dans un travail consacré à l'histoire de l'électro-physiologie. Nous ne voulons décrire, pour le moment, que le condensateur électro-chimique

de M. de La Rive, l'appareil de M. Ruhmkorff, et les appareils magnéto-électriques de Pixii et de Clarke.

§ Ier. — Condensateur électro-chimique.

M. de La Rive a eu la très heureuse idée d'utiliser l'*extra-courant*, pour renforcer l'intensité d'un courant voltaïque *inducteur*. Il est ainsi parvenu à décomposer l'eau avec des combinaisons voltaïques qui, *seules*, fournissent un courant trop faible pour traverser la masse liquide. L'appareil est représenté dans la Figure 365.

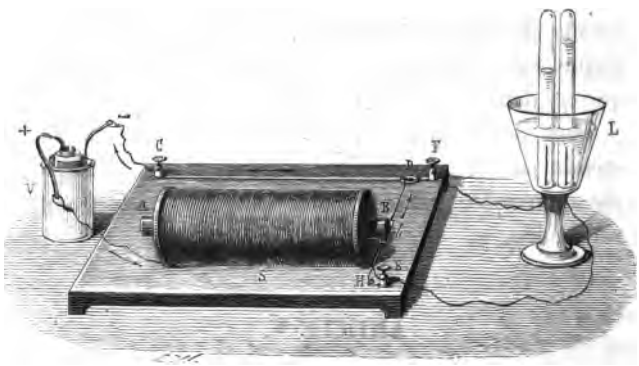


Fig. 365.

V est un couple de Daniell qui communique par son pôle positif avec une des extrémités d'une spirale S, et par son pôle négatif avec le bouton métallique C. Un barreau de fer doux AB est placé dans l'axe de la spirale. L'autre extrémité de la spirale est fixée au bouton métallique E. La coupe D, pleine de mercure, et le bouton E communi-

quent au moyen d'une tige métallique *élastique* H. Cette tige H, fixée en E, est libre à son extrémité D, et porte une pièce de fer doux *h* placée en face et au-dessous de l'extrémité B du barreau de fer doux AB. La coupe D communique avec les boutons C et F, au moyen d'un ruban métallique. Enfin, les réophores d'un voltamètre à eau acidulée L viennent se fixer l'un au bouton E, l'autre au bouton F.

Quand la tige métallique H est en place, puisque l'élément voltaïque V n'a pas assez d'intensité pour décomposer l'eau du voltamètre L, le courant traverse la spirale S, gagne le bouton E, passe *tout entier* par la tige H, se rend de la coupe D au bouton C, et de là au pôle négatif de l'électromoteur. Mais le barreau de fer doux s'aimante, soulève la tige métallique H et rompt le circuit en D; le courant est *interrompu*. Immédiatement, il se développe dans la spirale un *extra-courant*, dont la force électromotrice agit dans le même sens que celle de l'élément voltaïque V; le courant *résultant* de ces deux forces concordantes traverse le voltamètre L, et décompose l'eau. Après cette poussée, l'*extra-courant* cesse, l'élément voltaïque V agit seul, le courant n'a plus assez d'intensité pour traverser le liquide, et le circuit est *complétement* interrompu. Alors le fer doux AB perd son aimantation; la tige H, ramenée par son élasticité à sa position primitive, rétablit une communication directe entre le bouton E et la coupe D, et le courant voltaïque passe de nouveau, de E en D, par cette tige H.

Sous la double influence de l'action de l'électro-aimant AB sur la pièce de fer *h* et de l'élasticité de

la tige H, la communication du bouton E et de la coupe D est successivement interrompue et rétablie. A chaque *interruption*, l'extra-courant prend naissance et s'ajoute au courant de l'élément voltaïque V, pour faire passer un flux *instantané* d'électricité à travers le circuit du voltamètre. Grâce à cette disposition, ce dernier appareil est traversé par des courants *intermittents*, et l'eau est décomposée, bien que le courant fourni par l'élément voltaïque *seul* n'ait pas assez d'intensité pour surmonter la résistance du voltamètre.

La tige métallique H est un véritable *interrupteur* que, sous une autre forme, nous retrouverons dans le puissant appareil d'induction de M. Ruhmkorff.

§ XI. — Appareil magnéto-électrique de Pixii.

M. Pixii fils a, le premier, construit un appareil dans lequel les courants développés par l'induction d'un aimant produisent tous les effets d'une pile électrique. — A (Fig. 366) est un aimant en fer à cheval, mobile autour de son axe vertical. B est un fort barreau de fer doux, solidement fixé dans sa position; ses extrémités *e*, *f*, sont entourées de fortes bobines formées par l'enroulement d'un même fil de cuivre très long, très fin et recouvert d'une enveloppe isolante de soie. Quand, à l'aide de la manivelle M, l'aimant A est mis en rotation, ses pôles *a*, *b*, viennent passer successivement au-dessous et très près des extrémités *e*, *f*, du barreau de fer doux B.

La Figure 367 donne les détails de l'axe T qui supporte l'aimant mobile A, et de la planchette de bois LL située

au-dessous. — L'axe T porte trois viroles métalliques isolées les unes des autres ; les deux supérieures, s, s', font office de commutateur ; l'inférieure, o, sert dans les expériences physiologiques. — La planchette de bois LL porte

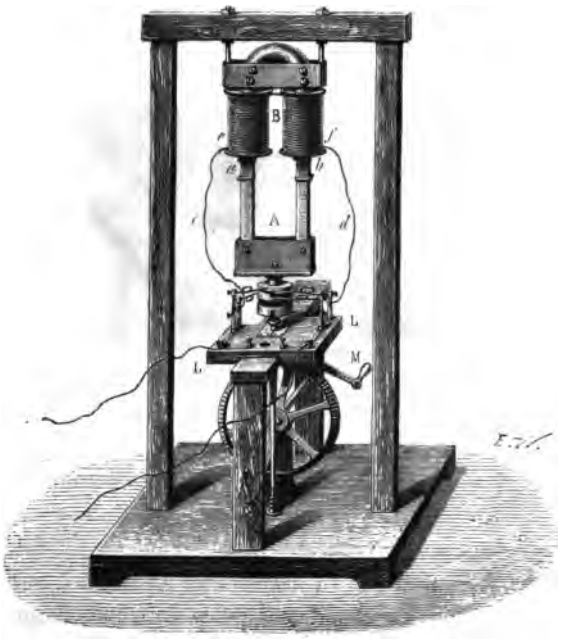


Fig. 366.

quatre colonnes métalliques P, P', D, D', dont les deux postérieures, P, P', servent à fixer les bouts c, d, du fil des bobines de l'électro-aimant B, tandis que les deux antérieures, D, D', sont en communication avec les boutons métalliques N, N'. Sur cette planchette est fixé, en K, un

flacon de verre contenant du mercure, que la Figure 368 reproduit avec tous ses détails.

Le circuit des bobines étant fermé et les pôles de l'aimant A étant en face des extrémités du barreau de fer doux B, imprimons à l'aimant un mouvement de rotation

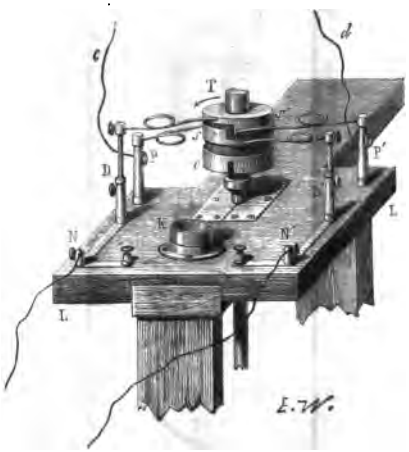


Fig. 367.

autour de son axe vertical. — Au point de départ, le barreau B est aimanté au *maximum;* à mesure que l'aimant A tourne, l'action de ses pôles s'affaiblit, l'aimantation de B diminue; quand A a exécuté un quart de révolution, les actions de ses pôles se neutralisent et B retombe à l'état neutre. — A partir de cette position, l'aimantation de B recommence, mais elle change de signe; pendant toute la durée du deuxième quart de révolution, l'action des pôles de A et l'aimantation des extrémités de B augmentent d'intensité. — Pendant le troisième

quart de révolution, l'aimantation de B s'affaiblit graduellement et finit par disparaître. — Pendant le quatrième quart de révolution, l'aimantation de B recommence, change de signe, et augmente graduellement. — Après cette révolution entière, quand les pôles de l'aimant A ont repris leur position du point de départ, l'aimantation de B est de même intensité et de même signe qu'au début de la rotation. — Ces alternatives de l'aimantation de B déterminent nécessairement, dans le fil des bobines, des courants induits qui changent de signe à chaque demi-révolution. En effet :

Pendant un tour complet de révolution de l'aimant A autour de son axe vertical, ses pôles *a*, *b*, prennent successivement, par rapport aux extrémités fixes *e*, *f*, du barreau de fer doux B, les quatre positions principales indiquées par la Figure 368. Pour faciliter l'exposition des phénomènes, représentons le sens de l'aimantation fixe des extrémités *a*, *b*, de l'aimant A, et de l'aimantation variable des extrémités *e*, *f*, du barreau de fer doux B, par les courants circulaires fermés de la théorie d'Ampère.

Dans la position 1, *e* est un pôle boréal, et *f* un pôle austral. — Pendant que l'aimant passe de la position 1 à la position 2, les pôles *e*, *f*, du barreau de fer doux B s'affaiblissent, et développent nécessairement dans le fil des bobines un courant induit *direct* dirigé de *c* en *d*. — Dans la position 2, l'aimantation de B est *nulle ;* mais, au moment où l'aimant A dépasse cette position 2, l'aimantation des extrémités *e*, *f*, change de signe, et l'intensité de cette nouvelle aimantation de B augmente à mesure que A se rapproche de la position 3. — Pendant ce second quart de

révolution, les pôles magnétiques de B développent nécessairement, dans le fil des bobines, un courant induit

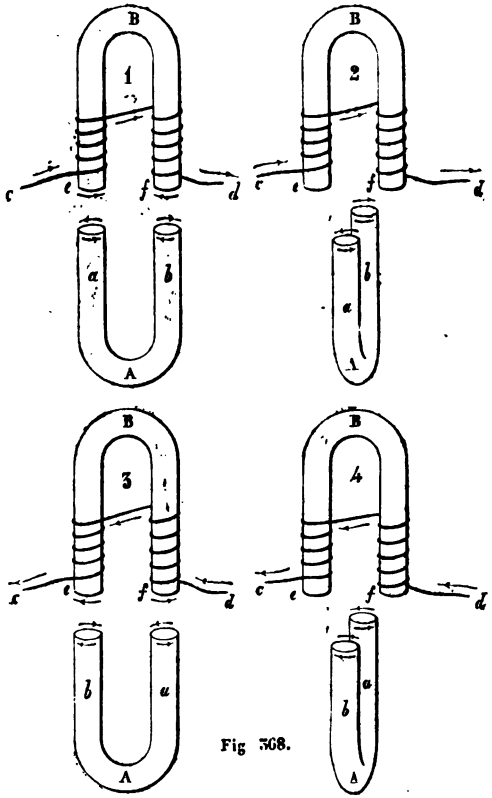


Fig 368.

inverse; mais comme ces pôles magnétiques de B ont eux-mêmes changé de signe, le courant induit continue à marcher, de *c* en *d*, dans le fil des bobines. — Ainsi, pendant la première demi-révolution de l'aimant A, le fil des bo-

bines est continuellement traversé par un courant induit dirigé de *c* en *d*.

Dans la position 3, *e* est un pôle austral et *f* un pôle boréal ; l'aimantation du barreau B est donc inverse de ce qu'elle était au début, alors que l'aimant A occupait la position 1. — Par raison de symétrie, l'aimantation de B s'affaiblissant pendant que A passe de la position 3 à la position 4, puis changeant de signe et gagnant en intensité pendant que A s'éloigne de la position 4 pour reprendre la position primitive 1, il est facile de voir que, pendant la seconde demi-révolution de l'aimant A, le fil des bobines est continuellement traversé par un courant induit dirigé de *d* en *c*.

Ainsi donc, tant que l'aimant A tourne autour de son axe, l'aimantation du barreau de fer doux B est soumise à des alternatives d'aimantation telles, que :

1° Le fil des bobines est continuellement traversé par un courant induit.

2° Le sens du courant induit reste le même pendant toute la durée d'une demi-révolution, et change à chaque demi-révolution de l'aimant.

Avec cet appareil on peut produire tous les effets physiques et chimiques du courant fourni par une pile.

Pour obtenir l'étincelle, on fait passer (Fig. 369) les extrémités *c*, *d*, du fil des bobines, à travers le bouchon de liége d'un flacon de verre K rempli en partie de mercure, et placé sur la partie antérieure de la planchette LL de l'appareil. L'un des bouts *c* plonge dans le mercure, l'autre touche sa surface. Quand l'aimant est en rotation, l'ébranlement de l'appareil imprime des oscillations au mercure

dont la surface tantôt touche, tantôt abandonne l'extrémité *d* du fil; le circuit est donc alternativement fermé et

Fig. 369.

interrompu. A chaque interruption, une étincelle jaillit entre l'extrémité *d* du fil et le mercure.

Une disposition très simple des viroles métalliques placées autour de l'axe de rotation T de l'aimant A, et des colonnes métalliques P, P′, D, D′, fixées sur la planchette LL (Fig. 370), permet d'obtenir un courant induit qui traverse, toujours dans le même sens, les appareils destinés à compléter le circuit du fil des bobines. — La surface de l'axe de rotation T est recouverte d'une substance isolante; autour de cet axe sont placées deux viroles métalliques *s*, *s*′, complétement isolées l'une de l'autre. Chacune de ces viroles est un anneau complet composé d'une partie rétrécie embrassant une moitié de la circonférence de l'axe, et d'une partie élargie embrassant l'autre moitié. La partie élargie

de la virole inférieure *s* est, d'ailleurs, placée au-dessous et vis-à-vis de la partie rétrécie de la virole supérieure *s'*.

La planchette de bois LL porte quatre colonnes mé-

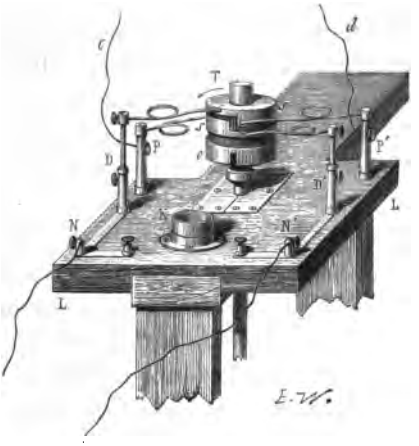


Fig. 370.

talliques P, P', D, D'.— Les colonnes postérieures P, P', au moyen de ressorts élastiques, communiquent avec les portions élargies des viroles *s*, *s'*; la longueur et la direction de ces ressorts est telle que, quand P communique avec *s*, P' communique avec *s'*, et réciproquement. De cette manière, quand l'aimant exécute un tour entier de révolution autour de son axe, les ressorts de P et de P' restent sur la même virole pendant une demi-révolution, et changent de virole à chaque demi-révolution. Les extrémités *c*, *d*, du fil des bobines, viennent se fixer aux colonnes P, P'. — Les colonnes antérieures D, D', sont munies de ressorts élastiques qui appuient, l'un sur la partie rétrécie

de s, l'autre sur la partie rétrécie de s'. Ces colonnes sont donc en communication permanente : D avec la virole supérieure s' et le bouton métallique N ; D′ avec la virole inférieure s et le bouton métallique N′. — Les boutons métalliques N, N′, au moyen des colonnes antérieures D, D′, des viroles s, s', et des colonnes postérieures P, P′, sont en rapport permanent avec les extrémités c, d, du fil des bobines. Ces boutons sont les véritables pôles de l'appareil, et servent à fixer les fils destinés à conduire le courant au dehors.

L'appareil ayant la position représentée dans la Figure 366, mettons l'aimant A en rotation, et suivons sur la Figure 370 les modifications qu'éprouvent les contacts des ressorts des colonnes et des viroles. — Supposons que, pendant la première demi-révolution, le courant induit traverse le fil de c en d ; nécessairement, pendant la seconde demi-révolution, le courant induit sera dirigé de d en c.

Au moment où le mouvement commence dans le sens indiqué par la flèche (Fig. 370), le ressort de la colonne P′ passe sur s, celui de la colonne P sur s', et ces contacts persistent pendant toute la première demi-révolution. Dès lors, pendant la première demi-révolution, le bout d du fil induit communique, par P′, avec la virole s, la colonne D′ et le bouton N′ ; tandis que le bout c communique, par P, avec la virole s', la colonne D et le bouton N. Puisque pendant cette première demi-révolution le courant traverse le fil des bobines de c en d, il en résulte que, pendant cette première demi-révolution, N′ est le pôle *positif* et N le pôle *négatif* de l'appareil.

Au commencement de la seconde demi-révolution, le ressort de P′ passe de la virole *s* sur la virole *s′*, celui de P de la virole *s′* sur la virole *s*, et ces nouveaux contacts persistent pendant toute la seconde demi-révolution. Dès lors, tant que dure la seconde demi-révolution, le bout *c* du fil des bobines communique, par P, avec la virole *s*, la colonne D′ et le bouton N′; tandis que le bout *d* communique, par P′, avec la virole *s′*, la colonne D et le bouton N. Mais, pendant cette seconde demi-révolution, le courant induit marche, de *d* en *c*, dans le fil induit; il en résulte que, pendant cette seconde demi-révolution comme pendant la première, le bouton N′ est le pôle *positif*, et le bouton N le pôle *négatif* de l'appareil.

Les viroles *s*, *s′*, font donc l'office de commutateur, et permettent d'obtenir, à travers les appareils mis en communication avec les boutons N, N′, un courant induit dont le sens reste toujours le même.

Lorsqu'on ferme le circuit avec un fil de platine très fin en communication avec les boutons N, N′, le fil s'échauffe et devient incandescent.

Lorsqu'on met les boutons N, N′, en communication avec les conducteurs d'un voltamètre, l'eau est décomposée, tout l'oxygène se dégage dans une des cloches et tout l'hydrogène dans l'autre cloche de l'appareil. Ce dernier fait prouve que le courant induit conserve toujours le même sens dans le voltamètre qui complète le circuit, entre les boutons N, N′.

Sur l'axe de l'appareil (Fig. 366, 370) est fixée une troisième virole *o* dont la partie inférieure porte quatre entailles équidistantes, qui occupent la moitié de sa hauteur. Cette

virole sert à produire des courants *interrompus* dans la partie du circuit placée entre les boutons N, N′. A cet effet, les extrémités *c*, *d*, du fil des bobines, sont fixées aux colonnes antérieures D, D′, et ces colonnes sont raccourcies, de manière que le ressort de D appuie sur la partie supérieure, et le ressort de D′ sur la partie inférieure de la virole *o*. Le circuit étant fermé entre N, N′, mettons l'appareil en mouvement. D communique toujours avec la virole *o*; tant que le ressort de D′ porte sur la partie pleine de la moitié inférieure de la virole, le circuit est fermé par les deux ressorts, le courant se rend *tout entier* directement de D en D′, et *rien* ne passe entre N et N′. Mais, quand le ressort de D′ se trouve en face d'une entaille, le circuit est interrompu sur la virole, et le courant passe *tout entier* entre N et N′. Nous avons dit que la virole *o* porte quatre entailles; pendant une révolution entière de l'aimant, le courant induit des bobines passe donc quatre fois tout entier à travers la portion du circuit placée entre les boutons N, N′.

Cette dernière disposition peut être adoptée dans les recherches de physiologie ou dans les applications thérapeutiques, quand on veut soumettre un animal à l'action d'une série de courants *interrompus*.

§ III. — Machine de Clarke.

Dans l'appareil de Clarke (Fig. 371), un fort aimant vertical en fer à cheval B est solidement fixé à une planchette de bois P; deux bobines munies d'un noyau de

fer doux peuvent tourner autour d'un axe horizontal A, en face des pôles de l'aimant B. Cet appareil ne diffère de

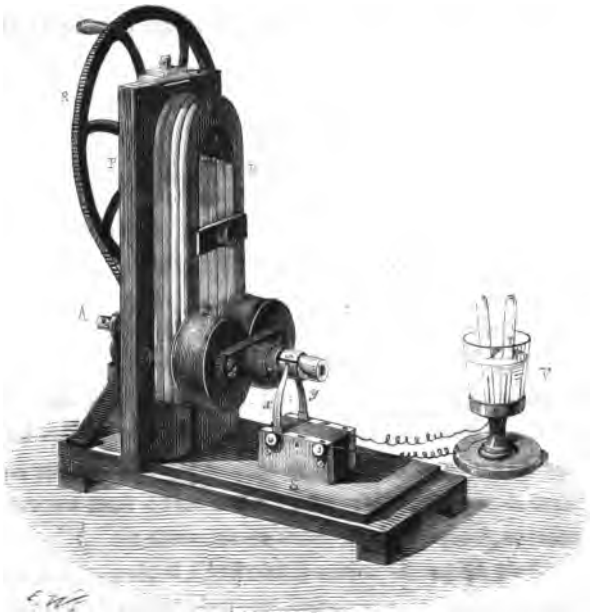


Fig. 371.

celui de Pixii que par la forme et la disposition de ses pièces constituantes; la théorie est la même pour l'un et pour l'autre.

La Figure 372 rend compte des détails de la construction de l'électro-aimant. H, H', sont deux fortes bobines de fil de cuivre très fin. Les extrémités des barreaux de fer doux qui font face à l'aimant sont reliées par une plaque épaisse de cuivre *cc*; cette plaque de cuivre est munie d'une vis *v*,

qui sert à fixer l'électro-aimant à un axe horizontal A (Fig. 371) placé entre les branches verticales de l'aimant B. Au moyen d'une chaîne métallique, la roue R sert à faire tourner l'axe sur lui-même; les bobines H, H',

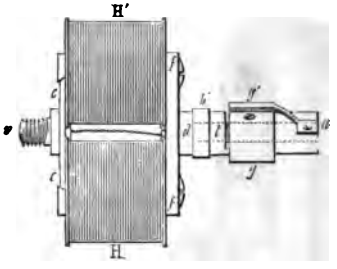


Fig. 372.

exécutent alors un mouvement de rotation en face des pôles de l'aimant fixe B. — Les autres extrémités des barreaux de fer doux de l'électro-aimant sont reliées par une plaque de fer doux *ff*; cette plaque sert à fixer un commutateur composé de la manière suivante :

d est un disque de cuivre jaune fixé à la plaque de fer *ff*, et prolongé par un axe métallique indiqué sur la figure en lignes ponctuées. Cet axe supporte un anneau de bois *b*, une virole métallique *t* séparée de l'axe par un cylindre de bois, enfin un long cylindre de bois garni de deux demi-viroles *g*, *g'*. Ces demi-viroles sont complétement isolées l'une de l'autre, le plan des fentes qui les séparent coïncide à très peu près avec celui des axes des bobines H, H'. La demi-virole *g'* est prolongée par une pièce métallique mince, dont l'élargissement *a* s'abaisse un peu au-dessous de la fente de séparation de *g'* et de *g*;

cette demi-virole g' communique avec l'axe métallique par l'intermédiaire d'une des vis qui servent à la fixer. La demi-virole g communique avec la virole t ; elle est prolongée par une pièce semblable à la pièce a et symétriquement placée.

Les bobines H, H', sont formées de fils indépendants ; l'une d'elles est *dextrorsum*, et l'autre *sinistrorsum*. Il en résulte que quand l'appareil est en mouvement, les courants induits développés dans les bobines sont de même sens, marchant ensemble tantôt de *cc* en *ff*, tantôt de *ff* en *cc*. Aux extrémités *cc*, les deux fils des bobines sont réunis et tordus en corde ; engagés dans un tube de verre isolant, ils traversent la pièce métallique *ff*, et sont fixés à la virole t qui communique elle-même avec la demi-virole g. Aux extrémités *ff*, les deux fils des bobines sont réunis aussi, traversent de même la pièce *ff*, et sont fixés à l'axe métallique qui communique lui-même avec la demi-virole g'.

De cette manière, les deux bobines H, H', au lieu d'être associées en *tension* comme dans l'appareil de Pixii, sont accouplées en *quantité*. Quand la machine est en action, les pôles de l'électromoteur d'induction sont l'un en g et l'autre en g'. Il est facile de voir que le sens du courant d'induction et le signe des pôles g, g', changent à chaque demi-révolution.

Au-dessous du commutateur des bobines (Fig. 371), se trouve une pièce de bois S dont les faces supérieure et antérieure sont garnies de deux bandes métalliques étroites et parallèles. Ces deux bandes métalliques sont percées de mortaises et de trous destinés à fixer des ressorts métal-

liques verticaux, et des fils servant de réophores. Dans la Figure 373, les ressorts métalliques x, y, communiquent, l'un avec la demi-virole g du commutateur, et l'autre avec la demi-virole g'.

Quand l'électro-aimant est en mouvement, chacun des ressorts x, y, passe d'une demi-virole à l'autre, à chaque

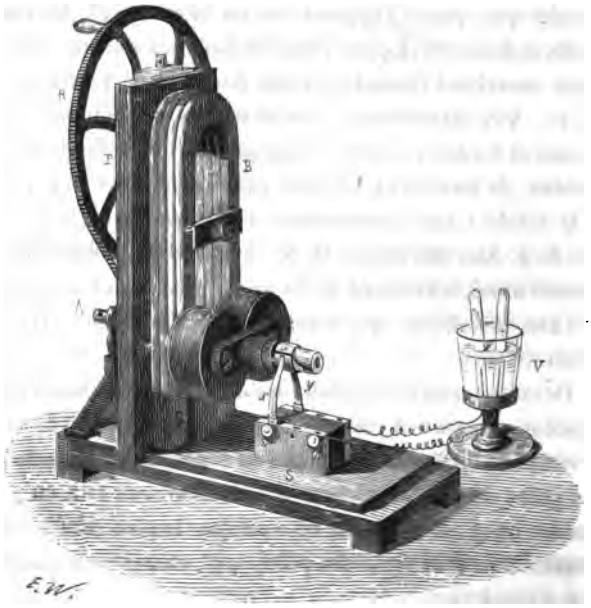


Fig. 373.

demi-révolution. Mais, puisque le signe de la tension électrique des demi-viroles du commutateur change à chaque demi-révolution, les ressorts x, y, deviennent les

véritables pôles de l'électromoteur et leur signe reste toujours le même.

Pour produire des effets électrolytiques (Fig. 373), après avoir mis les deux réophores du voltamètre à eau acidulée V en communication avec les bandes métalliques de la pièce S qui supportent les ressorts x, y, imprimons à l'électro-aimant un mouvement rapide de rotation. Le voltamètre complète le circuit de l'appareil d'induction, l'eau du vase V est traversée par un courant de sens constant, et les produits *séparés* de la décomposition électrolytique s'accumulent dans les éprouvettes.

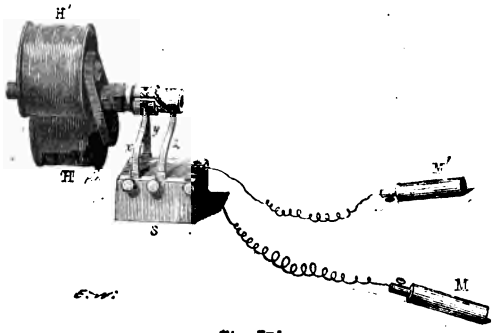


Fig. 374.

Pour surmonter la résistance du liquide, le courant d'induction doit avoir une très haute *tension*. On emploie, dans ce cas, le système des deux fortes bobines représentées Figure 372; elles sont formées par l'enroulement de fils de cuivre très longs et très fins.

Ces grosses bobines servent aussi, pour produire des effets physiologiques. On emploie alors trois ressorts (Fig. 374),

Les deux ressorts x, y, appuient sur les deux demi-viroles, comme dans le cas précédent, mais le ressort z, placé en avant, correspond à la tête élargie des pièces métalliques qui prolongent ces demi-viroles. Cela posé, mettons l'appareil en mouvement, et supposons qu'un homme prenne dans ses mains les deux mandrins M, M'. Pendant que le ressort z porte sur le cylindre de bois qui enveloppe l'axe, le courant passe à travers le corps de cet homme. Mais au moment où le ressort z touche le prolongement d'une des demi-viroles g, g', le ressort x, placé du même côté, touche nécessairement l'autre demi-virole; le circuit se trouve donc fermé par les ressorts x, z, et la bande métallique sur laquelle ils reposent; par conséquent, le courant cesse de traverser le corps de l'homme qui tient les mandrins M,M'. Il est facile de voir que, dans le cours de chaque révolution entière, le courant dirigé à travers le corps de l'homme est deux fois interrompu. Quand ces interruptions se succèdent très rapidement, les effets physiologiques sont très considérables.

Quand on veut produire des effets physiques, on remplace les fortes bobines à fil long et fin de la Figure 372 par un système de bobines à fil gros et court, associées en *quantité* et représentées dans les Figures 375 et 376.

Pour obtenir des étincelles (Fig. 375), on dispose l'appareil ainsi qu'il suit. Sur l'axe du commutateur on fixe une aiguille métallique a; sur la pièce de bois S on place un *seul* ressort x; enfin, à côté de ce ressort on dispose une capsule métallique c pleine de mercure. Les pôles de l'appareil d'induction sont l'aiguille a et le ressort x. D'ailleurs, le mercure de la capsule c et le res-

sort x communiquent par la lame métallique qui garnit la pièce de bois S. Quand l'appareil est en mouvement, l'extrémité de l'aiguille a plonge dans le mercure de la capsule c, alors le circuit est fermé. Au moment où l'extrémité de l'aiguille abandonne le liquide, le circuit est rompu; une étincelle éclate entre la surface du mercure et l'extrémité de l'aiguille qui s'éloigne. — Si l'on verse une couche d'alcool ou d'éther à la surface du mercure, l'étincelle de rupture enflamme le liquide.

Fig. 375.

Fig. 376.

La Figure 376 représente la disposition adoptée pour produire des effets calorifiques. o est un petit appareil composé de deux tiges métalliques verticales, dont l'une communique avec le ressort x et l'autre avec le ressort y. A leur partie inférieure, ces tiges sont reliées par une plaque isolante d'ivoire; elles portent, à leur partie supérieure, un fil de platine très fin qui sert à fermer le circuit. Quand l'électro-aimant est en rotation, le fil de platine est traversé par le courant d'induction; si le mouvement des bobines est rapide, le fil de platine acquiert une température assez élevée pour rougir, et même fondre.

§ IV. — Appareil de Ruhmkorff.

En 1851, M. Ruhmkorff dota la science d'un appareil d'induction dont la grande puissance dépend à la fois du jeu régulier de ses organes, de la longueur très considérable du fil de la bobine induite, et surtout du soin avec lequel ses divers tours de spire sont maintenus isolés les uns des autres. L'appareil est représenté en élévation dans la Figure 377, et en plan dans la Figure 378. Cette dernière figure permet de se rendre facilement compte des communications de tous les organes, et de suivre la marche du courant inducteur.

La spirale induite est une grosse bobine S, d'environ 30 centimètres de longueur sur 10 à 12 centimètres de diamètre; elle contient 25 à 30 *mille* tours d'un fil de cuivre d'*un quart* de millimètre de diamètre. Afin d'établir un isolement aussi complet que possible entre les diverses couches de la spirale et entre les diverses spires de chaque couche, ce fil, préalablement entouré de *coton*, est noyé dans une masse de gomme-laque (1). Cette bobine induite S est terminée par deux disques de verre. Les deux extrémités du fil induit sortent à travers un de ces disques,

(1) C'est uniquement pour diminuer les frais de construction que, dans ses appareils ordinaires, M. Ruhmkorff s'est contenté d'entourer le fil de la spirale induite d'une enveloppe de *coton*. Avec la *soie* l'isolement serait évidemment mieux établi. Nous verrons bientôt que M. Ruhmkorff a construit des machines dans lesquelles le fil de la spirale induite est entouré de *soie*, et qui produisent des effets beaucoup plus intenses.

et viennent se fixer aux boutons métalliques B, C, portés sur des colonnes isolantes de verre.

L'appareil inducteur se compose d'un faisceau de gros fils de fer bien dressés, et reliés par leurs extrémités au moyen de deux disques de fer doux. Ordinairement, on isole ces fils de fer en les enduisant de vernis, mais l'expérience démontre que la légère couche d'oxyde dont ils se recouvrent est un moyen d'isolement suffisant. Sur ce faisceau, dont le diamètre est de 3 centimètres, on enroule en spirale un gros fil de cuivre de *deux* millimètres à *deux* millimètres et *demi* de diamètre, et de 40 mètres de longueur. Cette bobine inductrice se compose d'environ 300 tours de spire maintenus isolés par des couches épaisses de vernis. Cet appareil inducteur est introduit dans la cavité de la bobine S, et séparé de la spirale induite au moyen d'un tube de verre qui déborde légèrement de chaque côté. Le faisceau des fils de fer est assez long pour faire saillie en dehors du tube de verre. Les bouts de la spirale inductrice traversent deux collets de bois qui les isolent du faisceau central de fils de fer.

L'une des extrémités du fil de la bobine inductrice se fixe à la colonne métallique D, et l'autre à la colonne F, qui communique elle-même avec l'équerre E' d'un commutateur pareil à celui de la page 174. La seconde équerre E du commutateur communique, au moyen d'un ruban de cuivre, avec les boutons métalliques I et H.

Un ruban de cuivre transversal fait communiquer le bouton I avec un cylindre vertical de cuivre *e* faisant office d'*enclume*. Sur cette enclume appuie un *marteau o*, dont la tête, de fer doux, est placée au-dessous de l'extré-

mité correspondante de l'électro-aimant, et dont le manche, de cuivre, s'articule avec l'extrémité de la colonne D. Un fil de cuivre sert à assurer la communication du manche du marteau et de la colonne métallique D. La face inférieure de la tête du marteau *o* et la face supérieure de l'en-

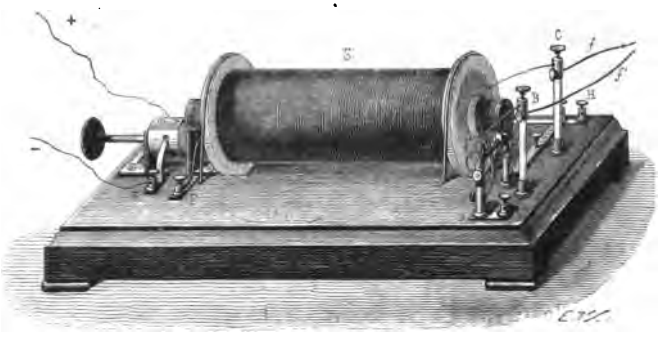


Fig. 377.

clume *e* sont planes, et garnies d'une plaque de platine. Ce marteau et son enclume forment un *interrupteur*. Quand la tête du marteau repose sur l'enclume, le circuit du courant inducteur est fermé; quand la tête du marteau, soulevée par l'électro-aimant, quitte l'enclume, le circuit est rompu.

Pour mettre l'appareil en action, faisons communiquer le pôle positif d'un couple de Bunsen avec le ressort R′ du commutateur, et le pôle négatif avec le ressort opposé R. — Si nous tournons le cylindre du commutateur de manière que le ressort R′ communique avec l'équerre E′, le courant passe du ressort R′ à l'équerre E′, gagne la colonne F, traverse la spirale inductrice, arrive

à la colonne D ; de là, le courant se dirige, à travers le marteau *o* et l'enclume *e*, vers le bouton I, gagne l'équerre E du commutateur, passe au ressort R, et enfin arrive au pôle négatif du couple. Dans cette position du commutateur, le courant parcourt la spirale inductrice de F en D. — Il suffit de faire décrire au commutateur

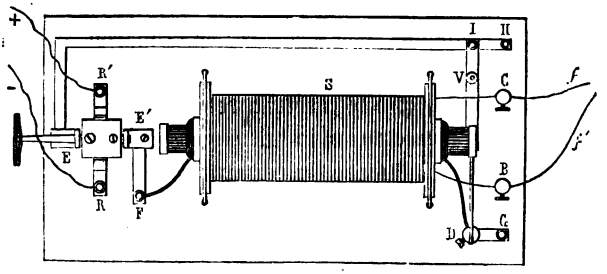


Fig. 578.

une demi-révolution pour renverser le sens du courant voltaïque, qui alors marche de D en F dans la spirale inductrice. Dans ce dernier cas, le courant sort du commutateur par l'équerre E, gagne le bouton I, passe dans le marteau *o* à travers l'enclume *e*, entre dans le fil de la spirale inductrice par la colonne D, arrive au bouton F, et se rend au pôle négatif par l'équerre E' et le ressort R.

Mais, au moment où le courant passe, le faisceau de fils de fer doux s'aimante, soulève le marteau *o* et interrompt le circuit. Au moment où le circuit est interrompu, le faisceau de fils de fer doux perd son aimantation, le marteau retombe sur l'enclume et rétablit la continuité du circuit. Quand le commutateur est placé de manière à laisser passer le courant, le marteau est donc animé d'un

mouvement de va-et-vient, qui l'entraîne alternativement de l'enclume à l'électro-aimant et de l'électro-aimant à l'enclume. Toutes choses égales d'ailleurs, plus le marteau est rapproché de l'électro-aimant, plus, dans un temps donné, le nombre des interruptions est considérable. Une petite vis V, placée sur le ruban de cuivre qui réunit l'enclume *e* au bouton I, permet de soulever et d'abaisser l'enclume à volonté; elle sert à régler la marche de l'interrupteur.

Toutes les fois que le marteau retombe sur l'enclume, il se développe un courant induit *inverse* dans la spirale S, sous la double influence du courant voltaïque qui commence et de l'aimantation du faisceau de fils de fer qui s'établit; quand, au contraire, le marteau est soulevé, le courant voltaïque qui finit et l'aimantation du faisceau qui cesse conspirent pour développer un courant induit *direct* dans cette spirale S.

Tel que nous venons de le décrire, l'appareil de Ruhmkorff produit déjà des effets d'une grande intensité. Quand on fait passer, à travers la spirale inductrice, le courant d'une pile de *quatre* ou *cinq* couples ordinaires de Bunsen, la tension des extrémités du circuit induit est assez considérable pour qu'une série continue de vives étincelles éclate, à l'air libre et à *quatre* ou *cinq* millimètres de distance, entre les extrémités opposées de deux gros fils de cuivre *f*, *f'*, mis en communication, au moyen des boutons C, B, avec les pôles de la bobine induite. MM. Fizeau, Masson et Poggendorff ont fait subir à cet appareil des modifications qui en ont considérablement augmenté la puissance.

Nous avons déjà vu que la vis V permet d'élever et d'abaisser à volonté l'enclume et la tête du marteau. Plus le marteau est rapproché de l'extrémité de l'électro-aimant, plus son mouvement de va-et-vient est accéléré. — Quand le marteau est fortement abaissé, les interruptions perdent de leur fréquence ainsi que les étincelles échangées par les extrémités des fils f, f' ; mais ces étincelles gagnent en longueur et en éclat, parce que le courant inducteur reste fermé assez longtemps pour rendre complète l'aimantation du faisceau de fils de fer. — Quand, au contraire, le marteau est très rapproché de l'électro-aimant, les interruptions sont très fréquentes, et l'aimantation du faisceau de fils de fer est incomplète ; dans ce cas, les étincelles se succèdent avec une grande rapidité, mais elles perdent de leur longueur et de leur éclat.

Condensateur annexé au circuit inducteur. — En 1853, M. Fizeau (1) modifia d'une manière très avantageuse l'appareil de Ruhmkorff. Pendant que l'appareil marche, une vive étincelle passe du marteau à l'enclume à chaque interruption du circuit inducteur. Ce phénomène indique que le courant inducteur n'est pas brusquement interrompu au moment où la tête du marteau est soulevée, mais qu'il est effectivement *prolongé* pendant quelques instants par un *extra-courant* dirigé dans le même sens. Cet *extra-courant* ne diminue pas la *somme*, mais prolonge la *durée* des actions inductrices de rupture. Il en résulte que le courant induit *direct* reste le même *en quantité*, mais ne s'élève pas au haut degré de *tension*

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1853, t. XXXVI, p. 418.

qu'il atteindrait si la rupture était instantanée. Pour remédier à cet inconvénient, M. Fizeau a disposé, sur le trajet du courant inducteur, un condensateur dont une armure communique avec le marteau, et l'autre avec l'enclume de l'interrupteur. Quand ce condensateur est en place, l'éclat des étincelles qui, à chaque interruption, passent de la tête du marteau à l'enclume, devient beaucoup plus faible. En même temps, la *tension* du courant induit est considérablement augmentée, et les extrémités des fils *f*, *f'*, échangent, à l'air libre, une série continue d'étincelles de *huit* à *dix* millimètres de longueur.

M. Ruhmkorff a combiné le condensateur de M. Fizeau, de manière à pouvoir l'adapter facilement à son appareil. Pour former ce condensateur, il colle deux feuilles de papier d'étain sur les deux faces d'une bande de taffetas gommé de *quatre* mètres de longueur, et il les recouvre de deux bandes pareilles de taffetas gommé; ces lames réunies sont ensuite repliées plusieurs fois sur elles-mêmes. Les surfaces d'étain représentent les armures de ce condensateur que l'on introduit dans l'intérieur du support de bois de l'appareil. Une des armures de ce condensateur communique avec le bouton métallique G et, par conséquent, avec le marteau *o*, par la colonne D; l'autre armure communique avec la colonne métallique H et, par l'intermédiaire du bouton I, avec l'enclume *e* de l'interrupteur.

Au moment de la rupture du circuit inducteur, les deux électricités de l'*extra-courant* trouvant à se répandre sur les armures du condensateur, la *tension* des surfaces de rupture est considérablement diminuée. Cette circonstance rend compte de l'affaiblissement des étincelles échangées

par l'enclume et le marteau, mais ne peut pas servir à expliquer pourquoi les *tensions* des extrémités de la spirale induite sont augmentées. Avec le condensateur, en effet, l'*extra-courant* n'est pas *supprimé*, il est simplement *dérivé*, et au lieu de s'établir, à travers l'air, entre les deux surfaces de rupture, cet *extra-courant* marche vers les faces du condensateur et *accumule* les deux électricités sur ses armures. Pour bien comprendre le véritable rôle du condensateur, il faut recourir à un autre ordre de considérations développées par M. L. Foucault.

Les armures du condensateur communiquent directement au moyen de la spirale inductrice, des diverses pièces du commutateur, et du circuit de la pile elle-même; elles se *déchargent* l'une sur l'autre par cette voie, quand le mouvement électrique de l'*extra-courant* est terminé. Ces armures sont donc des surfaces sur lesquelles les deux électricités de l'*extra-courant* viennent se *réfléchir*. Mais ce *changement de signe* de l'*extra-courant renverse le sens* de l'aimantation du faisceau de fils de fer, et développe une double action inductrice qui s'ajoute à celle de l'interruption du circuit voltaïque. Comme, d'ailleurs, les *changements de signe* s'opèrent d'une manière plus brusque et plus instantanée que les interruptions, le condensateur, en *réfléchissant* l'*extra-courant* sur lui-même, *exalte* réellement l'action inductrice totale et les *tensions* des extrémités des bobines. Seulement, le condensateur retarde *un peu* le moment où les *tensions* des extrémités du fil induit atteignent leur *maximum;* l'étincelle n'éclate pas entre les extrémités des fils *f*, *f'*, au moment de la rupture du circuit voltaïque, mais au moment de la *réflexion* de l'*extra-courant*.

Condensateur annexé au circuit induit. — Soit M (Fig. 379), une bouteille de Leyde, ou un condensateur quelconque porté sur un tabouret isolant. Au moyen des fils *f*, *f'*, faisons communiquer son armure intérieure avec

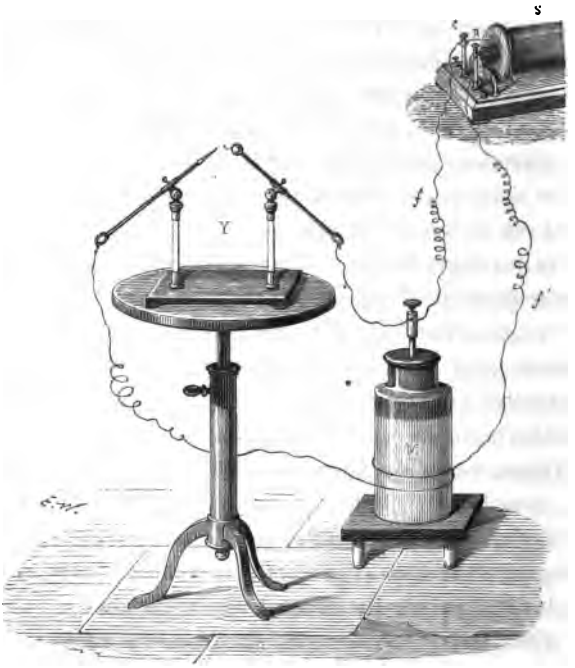


Fig. 379.

une des extrémités C de la spirale induite, et son armure extérieure avec l'autre extrémité B de cette spirale; puis, au moyen de fils métalliques, réunissons ces armures aux branches d'un excitateur Y. L'une des branches de l'excita-

teur se termine par une pointe et l'autre par une boule. Au moment où l'appareil est mis en action, une série continue d'étincelles éclate entre les extrémités des branches de l'excitateur. L'annexion du condensateur M au circuit induit a pour effet constant de modifier les étincelles ; pour un courant inducteur de même intensité, ces étincelles sont un peu plus courtes, mais plus grosses, plus instantanées et accompagnées d'un craquement plus sec. M. Masson a, le premier, employé cette disposition en 1853, dans un travail couronné, en 1854, par la Société royale de Harlem (1); le condensateur annexé au circuit induit a été adopté plus tard par M. Grove (2).

Avec un appareil de Ruhmkorff de dimensions ordinaires, il serait dangereux d'employer plus de *six éléments* de Bunsen pour fournir le courant inducteur ; une pile plus forte déterminerait, dans la spirale induite, des tensions trop élevées qui ne manqueraient pas d'entraîner la rupture des couches isolantes de gomme-laque, et de mettre l'appareil hors de service. Il résulte des expériences de M. Grove que, quand le condensateur M est annexé au circuit induit, on peut employer des courants inducteurs beaucoup plus intenses. Avec un condensateur dont chaque armure avait *quarante-six* décimètres carrés de surface, il a pu faire passer, à travers la spirale inductrice, le courant d'une pile de *trente* couples à acide azotique dont les lames métalliques étaient de *cinquante et un* centimètres carrés; il a obtenu ainsi, à l'air libre, un

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1855, t. XLV, p. 385.

(2) *Philosophical Magazine*, janvier 1855. — *Biblioth. univers. de Genève*, 1855, t. XXVIII, p. 142.

flot de larges étincelles de *quinze* millimètres de longueur. Il résulte encore des observations de M. Grove que la surface du condensateur annexé doit augmenter en même temps que la force de la pile. Mais, pour une intensité donnée du courant inducteur, il y a une étendue des surfaces du condensateur qu'il ne faut pas dépasser, et avec laquelle on obtient le *maximum* d'effet.

Le rôle du condensateur annexé au circuit induit est parfaitement expliqué par les considérations suivantes, empruntées à M. L. Foucault. — Quand les extrémités de la spirale induite sont directement en présence, il n'y a pas de mouvement électrique dans le circuit tant que les tensions ne sont pas assez considérables pour vaincre la résistance des couches d'air interposées. Pendant cette première période, la force électromotrice est tout entière employée à produire un effet statique, à rendre les tensions plus intenses; cette force n'agit donc dynamiquement, et n'accomplit de travail utile que pendant la durée très courte de l'étincelle. — Au contraire, quand le condensateur est annexé, le mouvement électrique commence dans le circuit avec l'induction elle-même: d'abord la force électromotrice accumule les électricités sur les surfaces du condensateur; puis, quand les tensions sont suffisantes, l'étincelle éclate, et la quantité d'électricité qui passe représente la totalité du travail utile accompli par la force électromotrice pendant la *charge* et pendant la *décharge* du condensateur.

Si, d'ailleurs, la décharge du condensateur s'opère entre les extrémités des branches de l'excitateur à travers l'air, au lieu de s'effectuer à travers le fil de la bobine, cela

tient, d'une part à la grande résistance du circuit induit, et d'autre part à la force électromotrice d'induction qui, n'étant pas encore épuisée, s'oppose à ce mouvement rétrograde des deux électricités.

L'annexion du condensateur doit donc avoir pour effet constant, ainsi que nous l'avons dit en commençant, de raccourcir la distance explosive, d'augmenter la quantité d'électricité qui passe avec l'étincelle, et de donner au phénomène ce caractère d'instantanéité et de craquement sec qui distingue les décharges d'électricité statique. De plus, comme la charge du condensateur dure un certain temps, il faut, conformément aux observations de M. Grove, ralentir convenablement la marche de l'interrupteur. Ce dernier résultat peut facilement être obtenu, soit en tenant la tête du marteau à une plus grande distance de l'extrémité de l'électro-aimant, soit par l'addition de petits poids qui rendent le marteau plus lourd.

Fractionnement de la bobine induite. — Dans l'appareil de Ruhmkorff, tel qu'il est sorti des mains de cet habile constructeur, les couches de tours de spire superposées dans l'hélice induite sont en nombre pair. Il en résulte que l'extrémité profonde et l'extrémité superficielle du fil enroulé sortent (Fig. 377) à travers le même disque de verre terminal. M. Poggendorff (1) fait observer que cette disposition est vicieuse, parce qu'elle a pour résultat de rapprocher les points de l'hélice sur lesquels les tensions doivent atteindre leur *maximum*. En effet, la résistance de la gomme-laque n'étant pas indéfinie, plus les extrémités

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1855, t. XLIV, p. 375.

de la bobine induite sont rapprochées, plus est faible l'action inductrice qu'on peut lui faire supporter, sans s'exposer à déterminer des ruptures dans les couches isolantes qui séparent les tours de spire. Pour remédier à cet inconvénient, M. Poggendorff a proposé de fractionner la spirale induite en un certain nombre de bobines partielles, composées, chacune, d'un nombre impair de couches de tours de spire superposées, et communiquant toutes les unes avec les autres. La Figure 380 représente un de ces appareils composé de *quatre* bobines partielles, et construit par M. Ruhmkorff sur les indications de M. L. Foucault.

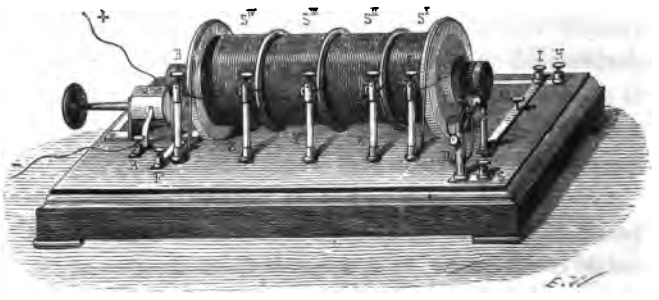


Fig. 380.

S^{I}, S^{II}, S^{III}, S^{IV}, représentent les quatre bobines partielles séparées par des disques isolants. La colonne C reçoit l'extrémité profonde de la bobine S^{I}. L'extrémité superficielle de S^{I} et l'extrémité profonde de S^{II} communiquent au moyen de la colonne X ; l'extrémité superficielle de S^{II} et l'extrémité profonde de S^{III} communiquent au moyen de la colonne Y ; l'extrémité superficielle de S^{III} et l'extrémité profonde de S^{IV} communiquent au moyen de la

colonne Z. Enfin, l'extrémité superficielle de la bobine S^{IV} vient se fixer à la colonne B.

De cette manière, C et B représentent les extrémités de la bobine *totale*. Dans chacun des quatre compartiments, les points correspondants au *maximum* de tension sont le plus éloignés possible, et d'ailleurs les couches isolantes de gomme-laque ne supportent que la pression de la différence de tension correspondante à l'action inductrice exercée sur chaque bobine partielle.

Avec cet appareil, on peut, sans s'exposer à des ruptures et sans annexer de condensateur au circuit induit, doubler la force de la pile, faire passer à travers la spirale inductrice le courant fourni par *dix* ou *douze* couples de Bunsen, et obtenir, à l'air libre, des étincelles de *vingt* millimètres de longueur entre les extrémités de deux gros fils de cuivre fixés aux colonnes terminales C, B.

Inégalité des deux courants induits. — L'appareil de Ruhmkorff, comme du reste toute combinaison de deux bobines d'induction, donne deux courants *induits*, l'un *direct*, au moment où le circuit inducteur est rompu, l'autre *inverse*, au moment où il est fermé.

Quand le circuit de la spirale induite est fermé avec le fil d'un galvanomètre ou avec un liquide bon conducteur tel que l'eau acidulée, le courant *direct* et le courant *inverse* passent alternativement, et exercent des actions de *même intensité* sur l'aiguille aimantée et sur l'électrolyte. — Mais, si, les dispositions restant les mêmes, on pratique une interruption dans le circuit, de manière que le courant soit obligé de traverser une couche d'air, la déviation de l'aiguille aimantée et les produits de l'électro-

lyse indiquent que l'électricité ne passe plus que dans un sens déterminé; le courant *inverse* est supprimé, et le courant *direct seul* traverse le circuit.

Les extrémités de la spirale induite étant maintenues à une distance suffisante pour qu'il n'éclate pas d'étincelle, mettons un électroscope *en contact* avec une de ses extrémités; dans ce cas, la charge communiquée à l'électroscope par la *même* extrémité du fil induit est tantôt *positive* et tantôt *négative*. — Mais, si, au lieu d'établir le *contact*, on se contente de rapprocher l'électroscope du fil induit jusqu'à ce qu'une étincelle soit échangée, on observe que la charge communiquée par la *même* extrémité de la bobine est toujours de *même nature*. Pour que cette dernière expérience réussisse bien, l'électroscope doit être présenté à l'extrémité *superficielle* de la spirale induite, pendant que l'extrémité *profonde* communique avec le sol.

Il résulte évidemment de ces observations de M. Poggendorff (1), que les deux courants induits sont égaux en *quantité*, mais que la tension électrique du courant *direct* l'emporte sur celle du courant *inverse*. Par suite de cette *inégalité* de tension, le courant *direct* passe *seul* dans les étincelles que les extrémités de la spirale induite échangent à l'*air libre*.

En se rappelant ce que nous avons dit (page 195 et suivantes) de l'influence des deux forces électromotrices d'*extra-courant* développées dans la spirale inductrice sur

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, 1855, t. XLIV, p. 379.

l'intensité des courants *inverse* et *direct* de la bobine induite, et la manière dont nous avons caractérisé (page 297) le rôle du *condensateur* annexé au circuit inducteur, il est facile de se rendre compte de cette *supériorité* du courant *direct* sur le courant *inverse*.

Inégale tension des extrémités de la spirale induite. — Quand on présente à l'extrémité *superficielle* de la spirale induite un conducteur qui ne fait pas partie du circuit, on peut obtenir des étincelles à distance. L'extrémité *profonde* de la spirale ne fournit jamais d'étincelle dans de pareilles circonstances. La *tension* électrique n'est donc pas la *même* aux deux extrémités du fil, celle du bout superficiel est beaucoup plus considérable que celle du bout profond. Cette inégalité bien constatée est due à un phénomène de condensation. Les parties centrales de l'appareil constituent un condensateur dont la lame isolante est représentée par le tube de verre placé entre les deux bobines, et dont les armures sont, d'une part la spirale inductrice et la masse métallique de l'électro-aimant, d'autre part les couches profondes de la bobine induite. On comprend ainsi comment l'électricité est condensée sur les couches centrales du fil induit, et pourquoi la *tension* de l'extrémité superficielle de la bobine induite est très supérieure à celle de son extrémité profonde.

Inégale température des deux pôles du courant direct. — Quand les deux extrémités de la spirale sont rapprochées à l'air libre, on obtient une série d'étincelles dues au passage du courant *direct seul*. Si, dans ces conditions, on rapproche à une petite distance les extrémités de deux fils de fer employés comme réophores; les deux

bouts en présence s'échauffent, mais celui qui joue le rôle de pôle *négatif* s'échauffe *seul* assez pour rougir et brûler. D'ailleurs, quand on renverse le sens du courant inducteur, les réophores changent de signe, et c'est toujours le fil *négatif* qui rougit et qui brûle. Cette supériorité de pouvoir calorifique du côté du pôle *négatif* permet de déterminer très facilement le sens du courant induit, sans recourir à l'emploi du galvanomètre.

ASSOCIATION DES APPAREILS DE RUHMKORFF EN SÉRIE.

Au mois de février 1856, M. L. Foucault s'exprimait ainsi dans une Note communiquée à l'Académie des sciences (1) :

« Les étincelles qu'on obtient actuellement des ma-
» chines inductives ne s'élancent guère au delà de 8 à
» 10 millimètres, et déjà pourtant elles accusent dans le
» courant d'induction une forte tension, dont le dévelop-
» pement dépend de l'intensité du courant inducteur et
» de la longueur du fil induit; mais ce qui favorise sur-
» tout cette haute tension, c'est la cessation plus ou moins
» brusque du courant inducteur. Or, il n'y a pas de
» moyen connu d'interrompre instantanément un courant
» qui circule avec intensité dans un long conducteur mé-
» tallique. La séparation, quelque rapide qu'elle soit, des
» pièces contiguës destinées aux contacts, n'a jamais lieu
» sans production d'une étincelle plus ou moins visible,

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLII, p. 215.

» qui montre que tout courant qu'on voudrait arrêter » court est effectivement prolongé pendant quelques in- » stants par un *extra-courant* dirigé dans le même sens. » Ces étincelles d'extra-courant sont plus vives, plus du- » rables et plus nuisibles à mesure que le courant inter- » rompu parcourt un plus long circuit; et comme celui-ci » se développe nécessairement avec les dimensions de » l'appareil, il arrive qu'en cherchant à les accroître, » on finit par perdre d'un côté ce que l'on gagne de » l'autre.

» Tel est en réalité l'obstacle qui, malgré l'adjonction » du condensateur de M. Fizeau, est venu s'opposer à ce » qu'on donnât une plus grande extension au phéno- » mène révélé par l'admirable découverte de M. Fa- » raday. »

Puis, M. L. Foucault se hâtait d'ajouter :

« Cependant, en assimilant les appareils d'induction » aux autres sources connues d'électricité dynamique, qui » toutes sont susceptibles d'être réunies en série et de » donner des effets de tension proportionnels au nombre » des éléments électromoteurs, j'arrivai à conclure qu'il en » serait de même entre plusieurs machines inductives, » pourvu qu'elles fussent assujetties à fonctionner d'une » manière concordante. »

M. L. Foucault ne tarda pas à justifier l'exactitude de ses prévisions. Mais, pour associer en série plusieurs appareils d'induction, il eut à surmonter des difficultés très sérieuses : d'une part, il dut imaginer un nouvel interrupteur à mercure pour remplacer l'interrupteur solide de M. Ruhmkorff, devenu insuffisant à cause de

l'intensité des courants employés ; d'autre part, il dut disposer les appareils d'induction accouplés en série de manière à les rendre solidaires et concordants.

Interrupteur de M. L. Foucault. — Dans l'appareil de Ruhmkorff, les surfaces de contact de l'enclume et du marteau sont garnies de lames de platine qui échangent une étincelle à chaque interruption. Grâce à l'élévation de son point de fusion et à son peu de tendance à l'oxydation, le platine résiste mieux et plus longtemps que les autres métaux à l'action de l'étincelle. Cependant, même avec un seul appareil et le courant de 5 à 6 éléments qui le traverse, cet interrupteur s'altère au bout d'un certain temps, le platine est attaqué par les étincelles de rupture, les surfaces de contact se déforment suffisamment pour qu'il devienne nécessaire de les renouveler. Quand le courant transmis acquiert une certaine intensité, l'interrupteur à contacts solides est rapidement mis hors de service ; les étincelles de rupture acquièrent assez de puissance pour déterminer des points de fusion sur les surfaces de contact, qui ne tardent pas à se souder.

Pour remédier à ce grave inconvénient, M. L. Foucault (1) a renoncé à l'emploi des contacts solides. La Figure 381 représente son nouvel interrupteur, ainsi que le condensateur de l'extra-courant.

UU, U'U', sont deux larges planches de bois entre lesquelles est placé le condensateur de l'extra-courant. Pour former ce condensateur, on fait une pile de lames d'étain rectangulaires, en ayant soin de séparer chaque

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLIII, p. 44.

lame métallique de celle qui la précède et de celle qui la suit par une feuille de taffetas gommé. Les lames d'étain de *rang pair* font saillie sur une des petites faces de la pile, et communiquent toutes entre elles; les lames d'étain de *rang impair* font saillie sur la face opposée, et communiquent aussi toutes entre elles. L'ensemble de ces lames métalliques et de ces feuilles isolantes constitue un condensateur dont une armure est représentée par les lames de *rang pair*, et la seconde armure par les lames de *rang impair*. Ce système est logé entre les planches de bois UU, U'U'. Aux extrémités de la planche supérieure UU se trouvent deux colonnettes de bois G, H, traversées par des fils métalliques destinés à faire communiquer les armures du condensateur avec deux points du circuit inducteur. A cet effet, l'un de ces fils communique avec les lames métalliques de *rang pair*, et l'autre avec les lames de *rang impair*.

Les diverses pièces de l'interrupteur sont fixées à une planchette de bois I I placée sur le condensateur. — L est une forte lame de cuivre rouge horizontale, et solidement fixée à un support de bois X, qui lui-même fait corps avec la planchette I I. Cette lame déborde le support X, et se continue par une lame de cuivre rouge R rigide, étroite et recourbée. Sur la partie de la lame L qui déborde le support X est soudée une traverse T de fer doux. A la lame recourbée R sont fixés deux appendices verticaux de platine P,P', dont le bout inférieur est taillé en pointe.

Au-dessous des pointes de platine P,P', sont placés deux verres *v*, *v'*; chacun de ces verres contient du *mercure* et de l'*alcool*. — Quand la lame LR est en repos, les pointes

de platine plongent dans l'alcool et ne touchent pas le mercure; mais, quand la lame LR est mise en vibration, ces pointes P, P', à la fin de chaque oscillation descendante, viennent plonger dans le mercure. — Un fil métallique fait communiquer le mercure du verre v avec le bouton

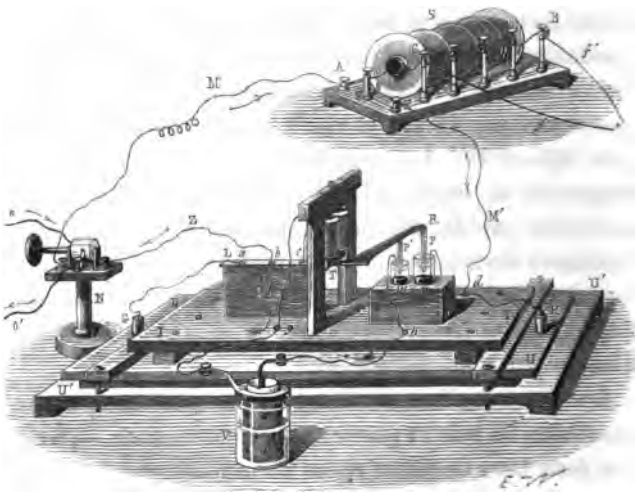


Fig. 381.

métallique d, qui lui-même communique, d'une part avec une des armures du condensateur à travers la colonnette H, et d'autre part, au moyen du fil M', avec le bouton métallique E, le bouton F et l'extrémité antérieure de la spirale inductrice de l'appareil d'induction S. — Un second fil métallique fait communiquer, en h, le mercure du verre v' avec le pôle négatif d'un élément de Bunsen V.

Au-dessus de la traverse de fer doux T, est disposé un

électro-aimant en fer à cheval. Les bobines de cet électro-aimant sont formées par l'enroulement d'un seul fil dont un des bouts communique, en *g*, avec le pôle positif de l'élément de Bunsen V, tandis que l'autre bout communique, en *c*, avec la lame de cuivre LR et la pointe de platine P′.

N est un commutateur de Ruhmkorff (page 174). Les boutons de ses ressorts latéraux communiquent, au moyen des fils O, O′, avec les pôles d'une pile de Bunsen; une de ses équerres communique, par le fil M, avec le bouton A, et, par son intermédiaire, avec l'extrémité postérieure de la spirale inductrice de l'appareil S; l'autre équerre communique, en *b*, par le fil Z, avec la lame de cuivre LR et la pointe de platine P.

Le fil métallique qui traverse la colonnette de bois G vient se fixer en *a*, et établit la communication d'une des armures du condensateur avec la lame de cuivre LR, et la pointe de platine P. L'interrupteur est donc, comme à l'ordinaire, placé entre les deux armures du condensateur qui, d'ailleurs, communiquent à travers la spirale inductrice de l'appareil S, le commutateur N, et la pile elle-même.

Dans ce système, il y a deux circuits voltaïques distincts:

Le premier comprend le couple V et l'électro-aimant de l'interrupteur. Ce circuit est fermé dans le verre *v′*, au moyen de la lame métallique LP′, toutes les fois que la pointe P′ est en contact avec la couche de mercure placée au fond de ce verre. Le courant du couple V a une action toute *locale;* il sert uniquement à faire marcher l'interrupteur, et à rendre son jeu indépendant du courant de la pile qui doit traverser la spirale inductrice de l'appareil S.

Le second circuit, ou celui de la pile, comprend la pile elle-même, le commutateur N et l'appareil d'induction S. Ce circuit est fermé dans le verre *v*, au moyen de la lame métallique LP, toutes les fois que la pointe P plonge dans la couche de mercure placée au fond de ce verre. Avec la position du commutateur N adoptée dans la Figure 381, le courant de la pile, ou *courant inducteur*, parcourt la spirale inductrice de l'appareil S, de son extrémité postérieure à son extrémité antérieure F.

Pour mettre l'interrupteur en action, on presse la lame de cuivre LR en avant du support X, jusqu'à ce que la pointe P′ plonge dans le mercure du verre *v′* ; le circuit du *courant local* du couple V est fermé, et l'électro-aimant agit par attraction sur la traverse de fer doux T. On abandonne alors à elle-même la lame LR, qui vibre par son propre ressort sous l'influence de l'électro-aimant. La pointe P′ plonge dans le mercure du verre *v′* à la fin de chaque oscillation descendante, et en sort au commencement de chaque oscillation ascendante ; le circuit du couple V est ainsi successivement fermé et rompu. Comme cette lame LR vibre en toute liberté, les contacts de la pointe P′ et du mercure du verre *v′* se succèdent avec une très grande régularité, ainsi qu'on en juge par la persistance du son rendu. Le mouvement vibratoire est assez rapide pour que le circuit soit rompu une *soixantaine* de fois par *seconde*.

Mais la pointe P, entraînée par le mouvement vibratoire de la lame LR, se conduit, par rapport au mercure du verre *v*, comme la pointe P′ par rapport au mercure du verre *v′*. Quand cette lame vibre sous l'influence du cou-

rant *local* du couple V, le circuit du *courant inducteur* de la pile éprouve donc aussi une *soixantaine* d'interruptions par *seconde* dans le verre *v*. En même temps les bouts des fils *f*, *f'*, en communication avec les extrémités de la spirale induite, échangent, à travers l'air, un nombre égal d'étincelles qui se succèdent avec assez de régularité pour que, dans le bruit crépitant qu'elles font entendre, l'oreille retrouve une tonalité distincte et conforme à celle de la lame vibrante.

M. L. Foucault explique ainsi qu'il suit le rôle de l'alcool qui surmonte le mercure dans les verres *v*, *v'* : « Dès les » premiers essais, j'ai reconnu qu'il serait impraticable de » distribuer d'une manière suivie un courant intense » avec le mercure nu ; par ce moyen l'interruption n'est » jamais assez subite, l'action inductrice reste faible, la » surface du métal s'oxyde en peu d'instants, et elle » émet d'abondantes vapeurs qui ne manqueraient pas à » la longue d'exercer leur action délétère. J'ai été ainsi » conduit à recouvrir le mercure d'une couche d'eau » distillée, ou mieux encore d'une couche d'alcool, ce » qui remédie en même temps aux divers inconvénients » que présentait l'emploi du mercure tout seul. En effet, » l'interruption du courant se produit sous l'alcool avec » un bruit sec qui dénote un arrêt brusque ; elle donne » lieu par suite à une forte étincelle d'induction ; » l'alcool se trouble promptement, mais il ne cesse pas » de condenser d'une manière efficace les vapeurs émises » au point de rupture, en même temps qu'il protége » contre l'oxydation la surface du mercure. L'appareil » continue donc à fonctionner avec régularité aussi long-

» temps que la pile est capable d'alimenter le courant » inducteur. »

Le passage suivant de la Note communiquée par M. L. Foucault à l'Académie des sciences fera comprendre tous les avantages de l'interrupteur à mercure tel qu'il l'a imaginé : — « En même temps qu'il régularise le départ » des étincelles, ce nouvel interrupteur appliqué aux » machines actuellement en usage est propre à en au- » gmenter, jusqu'à un certain point, la puissance. » Généralement il agit de manière à rendre les effets » proportionnels aux intensités du courant distribué, d'où » il suit que c'est particulièrement dans l'emploi des forts » courants qu'il présente un avantage marqué sur les » interrupteurs à contacts solides. »

Disposition pour l'association des machines d'induction en série. — Les Figures 382 et 383 représentent quatre machines de Ruhmkorff associées en série d'après la méthode proposée et réalisée par M. L. Foucault (1).— Chacune de ces machines est dépouillée de son interrupteur, de son condensateur et de son commutateur ; elles fonctionnent toutes à la fois sous la dépendance d'un même interrupteur à mercure I I, du même condensateur UU et du même commutateur N. Nous disons ici, une fois pour toutes, que l'étendue de la surface du condensateur commun UU annexé au circuit *inducteur* doit être réglée sur l'intensité du courant *inducteur* transmis à travers l'ensemble des appareils.

(1) La marche des courants, ainsi que les communications des appareils associés et des divers organes d'un même appareil, peuvent facilement être suivies dans la Figure 383.

Le commutateur N reçoit le courant du pôle positif de la pile par le fil O, et le transmet, par le fil M, à l'ensemble des spirales inductrices des quatre appareils. Ce courant s'échappe des spirales inductrices à travers le fil M', se rend à l'interrupteur II, gagne le commutateur N par le fil Z, et est ramené, par le fil O', au pôle négatif de la pile.

Le couple de Bunsen V fournit le courant *local* qui fait marcher l'interrupteur, et rend son jeu indépendant du courant *inducteur* de la pile. La marche du courant *local* est indiquée par des flèches *empennées*.

Les quatre machines composent deux groupes de deux appareils symétriquement disposés. Des systèmes de communications distincts sont établis entre les extrémités des bobines inductrices et les extrémités des bobines induites.

Communications des spirales inductrices. — Les spirales inductrices sont reliées par deux systèmes d'arcs métalliques; l'un de ces systèmes est pour les courants qui pénètrent dans les spirales, et l'autre pour les courants qui en sortent. La marche des courants qui pénètrent est indiquée par des flèches *pleines*, la marche des courants qui sortent est indiquée par des flèches *ponctuées*.

Un simple coup d'œil jeté sur la Figure 383 montre que le courant de la pile, arrivé, par M, au bouton A de l'appareil 1, se partage en quatre courants *inducteurs* distincts et de même intensité, un pour chacune des spirales *inductrices*. Les spirales *inductrices* des appareils 1 et 3 sont toutes deux traversées dans le même sens, de D en F; les spirales inductrices des appareils 2 et 4 sont au contraire traversées toutes les deux de F en D.

Les quatre courants partiels *inducteurs*, au sortir des

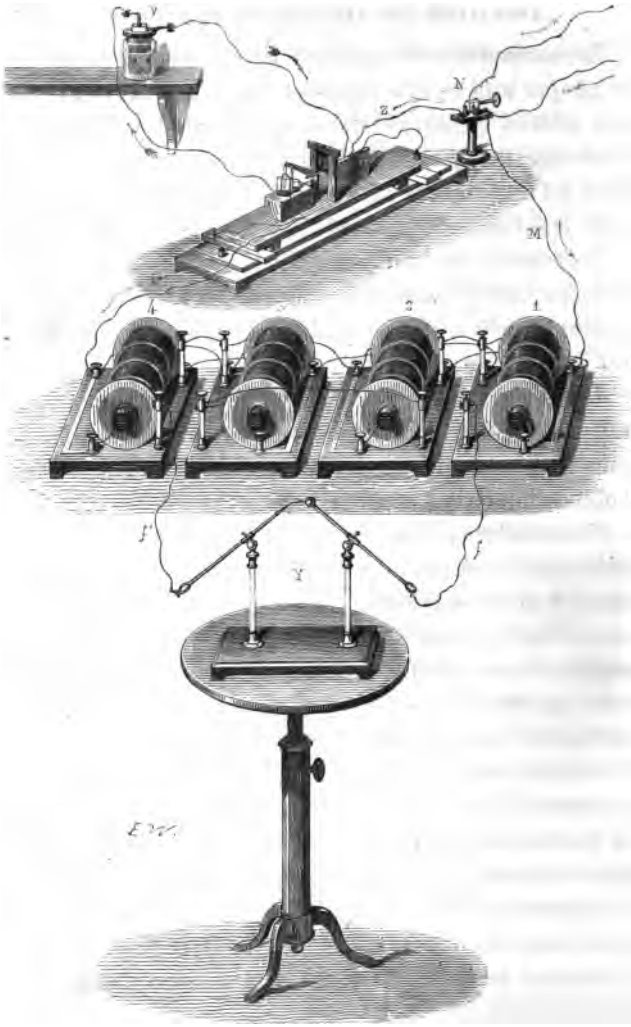


Fig. 582.

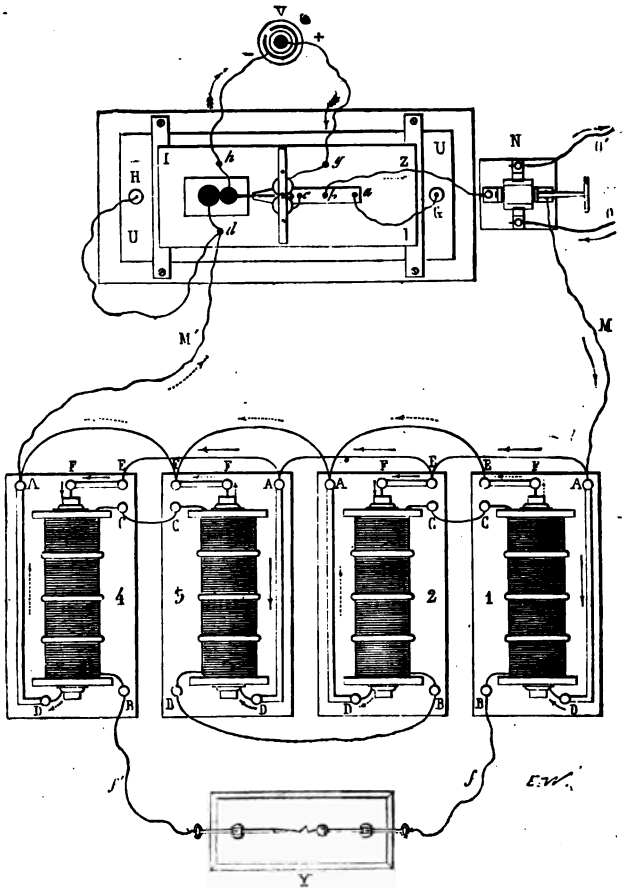


Fig. 383.

spirales inductrices, se réunissent au bouton A de l'appareil 4, passent dans le fil M' et regagnent la pile à travers l'interrupteur II, le fil Z, et le commutateur N.

Communications des spirales induites. — Puisque, dans deux appareils successifs, les spirales *inductrices* sont traversées par deux courants de sens inverses, il est facile de voir que, si aucune communication n'était établie entre les quatre spirales induites, les extrémités C, C, des spirales induites des appareils 1 et 2 prendraient des tensions électriques égales et de signes contraires. — Il en serait évidemment de même des extrémités B, B, des spirales induites des appareils 2 et 3, des extrémités C, C, des spirales induites des appareils 3 et 4, et enfin des extrémités B, B, des spirales induites des appareils 1 et 4. — En définitive, ces quatre spirales *induites* sont des éléments électromoteurs distincts, disposés dans un ordre tel que les extrémités *homologues* des deux spirales contiguës représentent des pôles de *signes contraires*.

Si donc on réunit par des communications métalliques les colonnes C, C, des appareils 1 et 2, les colonnes B, B, des appareils 2 et 3, et les colonnes C, C, des appareils 3 et 4, l'ensemble des quatre machines représente une véritable *pile d'induction*, et les pôles de cette combinaison sont les colonnes B, B, de l'appareil 1 et de l'appareil 4. Dans ce système, d'ailleurs, la distribution des tensions suit la même loi que dans une série électromotrice quelconque. Ainsi :

1° La tension électrique est *nulle* dans la région médiane du circuit, c'est-à-dire aux extrémités réunies B, B, des spirales induites des appareils 2 et 3 A partir de cette ré-

gion, les tensions, *positives* d'un côté, *négatives* de l'autre, acquièrent des valeurs d'autant plus grandes, qu'on les observe dans des points du circuit plus rapprochés des extrémités libres B, B, des appareils 1 et 4.

2° Les extrémités réunies C, C, des spirales induites des appareils 1 et 2 ont une tension commune, égale et contraire à celle des extrémités réunies C, C, des spirales induites des appareils 3 et 4.

3° La différence algébrique des tensions des extrémités de chacune des spirales induites conserve exactement la valeur qu'elle atteindrait, si l'appareil auquel elle appartient fonctionnait à part sous l'influence du courant qui traverse sa spirale inductrice.

4° La différence algébrique des tensions des extrémités libres B, B, des spirales des appareils 1 et 4, ou des *pôles* du système, est égale à *quatre fois* la différence des tensions des extrémités de chacune des spirales induites de la série.

5° Cette pile d'induction, composée de *quatre appareils*, se comporte comme une machine *unique* dont la force électromotrice serait *quadruple* de celle de chacun des appareils associés en série.

Grâce à ces dispositions, les divers courants *inducteurs* sont des fractions égales d'un courant unique, et sont tous interrompus et fermés *en même temps* par un seul interrupteur; de plus les extra-courants produisent une étincelle unique, sont recueillis sur le même condensateur et réfléchis *en même temps* à travers les spirales inductrices et la pile elle-même. Ainsi se trouve résolu le problème si intéressant et si délicat que s'était posé M. L. Foucault : « Éta- » blir entre plusieurs machines une solidarité qui main-

» tienne entre les diverses phases des courants inducteurs » une concordance parfaite. »

Dans cette pile de machines d'induction, la somme des tensions se trouve partagée entre les divers éléments électromoteurs; et, dans chacun des appareils associés, la différence des tensions des extrémités de la bobine *induite* conserve la valeur qu'elle aurait atteinte, si cet appareil avait fonctionné seul sous l'influence du courant *partiel* qui traverse sa spirale inductrice. Il en résulte que, sans s'exposer à crever les bobines *induites*, on peut soumettre cette combinaison à l'action d'un nombre de couples proportionnel à celui des machines dont elle se compose. La différence des tensions des extrémités de la série induite, et la longueur des étincelles qu'échangent ses pôles augmentent nécessairement dans le même rapport.

Avec la série de quatre appareils représentée dans les Figures 382 et 383, M. L. Foucault emploie habituellement une pile de 30 à 40 couples de Bunsen de dimensions ordinaires. Les étincelles échangées à l'air libre par les extrémités de l'excitateur Y ont de *huit* à *dix* centimètres de longueur; ces étincelles sont volumineuses, très éclatantes, et se succèdent avec une telle rapidité, que les branches de l'excitateur paraissent réunies par un trait de feu continu.

M. L. Foucault vient de faire sublir à son interrupteur à mercure une modification qui permet de doubler les effets d'une série de machines inductrices associées en tension. Nous ne saurions mieux faire que de reproduire ici textuellement la Note communiquée à la Société philomatique par ce physicien :

« Lorsque l'interrupteur à mercure fonctionne, l'in-

» terruption du courant inducteur a lieu par l'effet de » l'émersion de la partie vibrante hors du mercure destiné » à fermer le circuit ; et comme l'émersion dure à peu » près autant que l'immersion, il en résulte que la pile » chargée de fournir le courant inducteur demeure » inactive la moitié du temps. J'ai donc cherché à utiliser » ce temps perdu, et j'ai réussi en faisant de l'interrup- » teur un instrument *à double effet*.

» Dans la nouvelle disposition que je vais essayer de » décrire, la pièce vibrante est disposée de manière à » opérer alternativement la distribution par l'une et par » l'autre extrémité ; elle est donc terminée par deux » crochets qui s'engagent de part et d'autre dans les » godets à mercure. Cette pièce vibrante est horizontale- » ment suspendue par une lame élastique qui lui permet » d'osciller de part et d'autre de sa position d'équilibre » à peu près comme un fléau de balance ; chacun des bras » porte un barreau de fer doux placé en regard d'un » électro-aimant destiné à perpétuer le mouvement vibra- » toire.

» Par cette disposition, les deux branches de l'inter- » rupteur fonctionnent alternativement pour distribuer » le même courant, et, tous les organes étant répétés en » double, l'appareil présente une symétrie parfaite.

» Pour mettre l'appareil en activité, il faut verser du » mercure dans les deux godets jusqu'à ce que la surface » libre du liquide approche de très près l'une et l'autre » pointe de distribution ; on verse ensuite l'alcool par- » dessus. Les communications étant établies, il suffit » d'incliner la pièce vibrante pour la faire plonger dans

» l'un des deux godets, et pour établir un mouvement » vibratoire qui se perpétue ensuite de lui-même.

» En tenant compte de la description qui vient d'être » indiquée, on comprend aisément que chacune des » branches de l'interrupteur *à double effet* agit au service » du même courant comme agirait la branche unique » d'un interrupteur simple ; mais, comme elles fonction- » nent alternativement, elles suppriment réciproquement » leurs temps perdus, et elles ne laissent le courant » inducteur interrompu que pendant la durée du temps » strictement nécessaire à la manifestation des phéno- » mènes d'induction. Aussi l'interrupteur *à double effet* » donne-t-il dans l'unité de temps un nombre d'étin- » celles double de celui que fournit l'interrupteur simple, » sans qu'il en résulte un affaiblissement sensible dans » l'intensité de chaque décharge considérée isolément. » Les effets sont donc sensiblement *doublés*, ce qui motive » la dénomination que je propose d'affecter au nouvel » interrupteur. »

Dans ces derniers temps, M. Ruhmkorff a considérablement augmenté la puissance de sa machine d'induction, en modifiant les dimensions de la bobine induite et les moyens d'isolement des tours de spire du fil métallique qui la compose. — Dans ses nouveaux appareils, la bobine induite a 50 centimètres de longueur sur 18 centimètres de diamètre. Le faisceau de fils de fer formant le noyau de la bobine a $4^{cm},5$ de diamètre. De plus le fil de cuivre, au lieu d'être entouré de *coton*, est soigneusement recouvert d'une enveloppe isolante de *soie*. Enfin, M. Ruhmkorff a renoncé à l'interrupteur solide ; ses nou-

veaux appareils sont munis d'un interrupteur à mercure de M. L. Foucault (p. 310, Fig. 381).

Sous l'influence d'un courant inducteur fourni par une pile de *dix* couples Bunsen à *grandes surfaces*, *un seul* de ces nouveaux appareils donne, à l'air libre, des étincelles de *quinze* centimètres de longueur.

M. Ruhmkorff a aussi opéré avec *deux* de ces nouveaux appareils associés en série. Dans ce cas, sous l'influence d'un courant inducteur fourni par *dix* éléments de Bunsen à *grandes surfaces*, le système donnait, à l'air libre, des étincelles de *vingt-cinq* centimètres de longueur. Une lame de verre d'*un* centimètre d'épaisseur est percée d'un trou, quand elle est placée sur le trajet des étincelles, entre les pôles des deux spirales induites.

Du reste, pour obtenir ces grandes étincelles, il est nécessaire de donner, au faisceau de fils de fer formant noyau de la bobine inductrice, le temps d'atteindre son *maximum* d'aimantation ; il faut, par conséquent, ralentir la marche de l'interrupteur. De cette manière, les tensions des extrémités des bobines induites sont plus fortes; mais si les décharges s'opèrent à des distances plus grandes, elles se succèdent moins rapidement, et les étincelles perdent en fréquence ce qu'elles gagnent en longueur.

Comparaison des appareils d'induction et des autres électromoteurs. — Dans tout mouvement d'électricité, il y a à considérer deux éléments importants : la *tension* et la *quantité*. D'après ce que nous avons dit précédemment (page 150 et suiv.), la *quantité* est *faible* et la *tension* est *considérable* dans les phénomènes produits par les machines à plateau de verre ; tandis que, dans les courants

fournis par les piles hydro-électriques, une *quantité considérable* d'électricité circule sous une *faible tension*.

Nous venons de voir que les appareils d'induction, composés d'une bobine inductrice à fil *gros* et *court*, d'un barreau de fer doux et d'une bobine induite à fil *fin* et *très long*, fournissent des courants *induits* capables de produire, à l'air libre, de *longues étincelles* qui se succèdent avec une grande rapidité. Le courant *induit* l'emporte donc *en tension* sur le courant *inducteur*, mais, en même temps, il lui est inférieur *en quantité*. Ces courants d'induction se placent, par leurs propriétés, entre les jets d'électricité des machines à plateau de verre, et les courants voltaïques, se rapprochant des premiers par la *tension* et des seconds par la *quantité*.

De ce point de vue, les appareils d'induction nous apparaissent comme de vraies machines de transformation. Ces appareils modifient, sans l'augmenter ni la diminuer, la force représentée par le courant voltaïque *inducteur*, lui font gagner en *tension* ce qu'ils lui enlèvent en *quantité*, et permettent de produire, avec des piles hydro-électriques de *trente* à *quarante* couples, des effets qui nécessiteraient l'emploi d'une puissante machine à plateau de verre.

CHAPITRE VI.

ACTION DU MAGNÉTISME SUR LA LUMIÈRE ET SUR TOUS LES CORPS.

Vers le commencement de ce siècle, Coulomb chercha à déterminer l'influence des barreaux aimantés sur les substances autres que le fer et ses composés (1). Dans ce but, il taillait de petites aiguilles, de 7 à 8 millimètres de longueur et de trois quarts à un quart de millimètre de diamètre, et il les suspendait, au moyen d'un fil de soie sans torsion, entre les pôles de noms contraires de deux forts aimants. Il trouva ainsi que toutes ces aiguilles, quelle que fut leur nature, étaient *attirées* et se plaçaient dans la ligne des pôles. L'or, l'argent, le cuivre, le plomb, l'étain, le verre, des fragments d'os et de diverses espèces de bois lui donnèrent les mêmes résultats. Ces observations tendaient à faire admettre que tous les corps sont *attirés par l'aimant*, et ne diffèrent les uns des autres que par l'*intensité* de l'action qu'ils éprouvent en présence des barreaux aimantés. Cependant les recherches de Coulomb lui-même prouvent qu'il suffirait de la présence de $\frac{1}{13280}$ de fer dans une aiguille d'argent pour la rendre sensible à l'action directrice d'un aimant, en supposant l'argent lui-même parfaitement neutre. En présence de ce dernier résultat et des faits nouveaux dont la science

(1) *Journal de physique*, 1802, t. LIV, p. 367. — Biot, *Traité de physique expérimentale et mathématique*, 1816, t III, p. 117.

s'est enrichie, il est impossible de ne pas admettre que, si, dans les expériences de Coulomb, les barreaux aimantés ont *constamment attiré* les corps soumis à leur action, cet effet doit être attribué, du moins pour beaucoup de ces substances, à la présence de très minimes quantités de fer dans les aiguilles essayées.

Longtemps après Coulomb, M. Becquerel (1) soumit à l'action des courants voltaïques et des barreaux aimantés, des cartouches remplies d'un mélange de deutoxyde et de tritoxyde de fer en poudre, ou seulement de tritoxyde de fer pulvérisé et de petites aiguilles de bois, de gomme-laque, etc. Il crut devoir conclure de ces expériences que : « Dans le fer doux et l'acier la distribution du magnétisme » se fait *toujours dans le sens de la longueur*, à l'exclusion » de tout autre direction, tandis que dans le tritoxyde de » fer, le bois, la gomme-laque, etc., elle a lieu *la plupart* » *du temps dans le sens de la largeur, et toujours lorsqu'on* » *n'emploie qu'un seul barreau.* »

Lebaillif (2) montra que les barreaux de bismuth et d'antimoine exercent une action *répulsive* sur les pôles d'une aiguille aimantée. Déjà, dès 1778, Brugmanns avait constaté cette propriété singulière dans le bismuth.

Ces diverses tentatives restèrent sans résultats ; elles étaient à peu près complétement oubliées lorsque, en 1845, M. Faraday (3) prouva que, dans certaines circonstances

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1824, t. XXV, p. 269; — 1827, t. XXXVI, p. 337.

(2) *Bibliothèque univers. de Genève*, 1829; t. XL, p. 82.

(3) *Experimental Researches*, t. III; — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1846, t. XVII, p. 359.

déterminées, un faisceau de lumière polarisée est influencé par les pôles d'un aimant. A la suite de cette brillante découverte, l'éminent physicien fut naturellement conduit à reprendre l'étude de l'action du magnétisme sur tous les corps (1). Il trouva que les pôles d'un aimant agissent sur toutes les substances simples ou composées, solides, liquides ou gazeuses; mais tandis que les unes sont *attirées* comme le fer doux et l'acier, les autres sont *repoussées*. Les faits découverts par M. Faraday l'ont engagé à proposer une nomenclature nouvelle, très commode et très simple, qui est aujourd'hui généralement adoptée par les physiciens.

L'épithète *magnétique*, conservée comme expression générale, sert à caractériser l'action, *attractive* ou *répulsive*, du magnétisme sur un corps quelconque, et tous les phénomènes ou effets produits par cet agent. Quand on veut indiquer qu'un corps est influencé par le magnétisme, sans d'ailleurs spécifier si l'action qu'il éprouve est *attractive* ou *répulsive*, on dit que ce corps est *magnétique*.

Dans cette nomenclature, les corps *magnétiques*, ou influencés par le magnétisme, sont divisés en *paramagnétiques* et *diamagnétiques*. Les premiers se conduisent comme le fer doux et sont *attirés;* les seconds sont *repoussés* par les pôles d'un aimant.

(1) *Experimental Researches*, t. III. — *Biblioth. univ. de Genève*, 1846, t. II, p. 42 et 145; — 1846, t. III, p. 338; — 1849, t. XII, p. 89; — 1851, t. XVI, p. 52 et 89.

ARTICLE PREMIER.

ACTION DU MAGNÉTISME SUR LA MATIÈRE PONDÉRABLE.

Pour étudier l'action du magnétisme sur la matière pondérable, on peut employer soit des barreaux d'acier aimantés, soit des électro-aimants, soit des hélices de fil de cuivre traversées par des courants électriques. Quel que soit l'appareil mis en usage, les phénomènes observés sont de même nature. Mais, en raison de la puissance considérable qu'on peut leur communiquer, les électro-aimants agissent avec une grande intensité, permettent de mesurer les effets avec une grande exactitude, et sont généralement préférés aux hélices électro-dynamiques et même aux barreaux d'acier aimantés. M. Ruhmkorff a construit un électro-aimant très puissant, avec lequel on peut très facilement répéter les expériences relatives à l'action du magnétisme sur tous les corps.

S, S′ (fig. 384) sont deux grosses bobines enroulées autour de deux forts cylindres de fer doux percés d'un trou circulaire dans toute leur longueur. Le fil des bobines est maintenu en place, au moyen de plaques terminales et circulaires de cuivre. Les cylindres de fer doux sont solidement fixés aux équerres de fer doux E, E′, appuyées sur une forte traverse de fer doux T, qui est supportée elle-même par quatre pieds de cuivre. Les équerres E, E′ peuvent glisser dans une rainure pratiquée dans la traverse T; la règle R permet de mesurer le degré variable d'écartement des extrémités libres des bobines S, S′. En n, n, les équerres de

fer doux E, E′ sont traversées par des tiges de cuivre isolées au moyen de tubes de verre. Ces tiges de cuivre reçoivent les bouts libres du fil des bobines, et permettent de mettre ces fils en communication avec les pôles d'une pile.

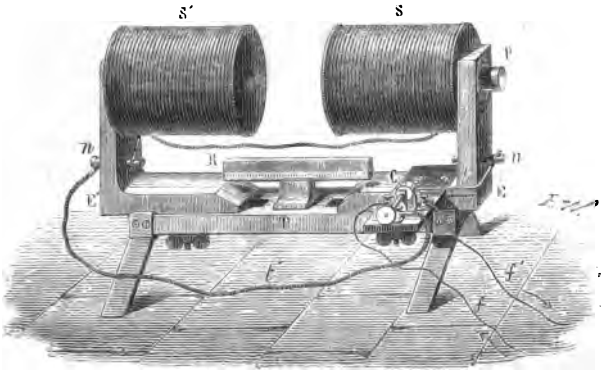


Fig. 384.

C est un commutateur pareil à celui de la page 174. Ses ressorts latéraux communiquent, au moyen des fils f, f', avec les pôles d'une pile. Les fils t, t', fixés aux équerres du commutateur, communiquent, en n, n, avec le fil des grosses bobines S, S′ de l'électro-aimant.

Pour mettre l'appareil en action, il suffit de fermer le circuit avec le commutateur C. On peut d'ailleurs, avec ce même commutateur, changer à volonté le sens du courant dans le fil des bobines S, S′.

Nous avons représenté, dans les figures 385, 386, 387, 388, des pièces de *fer doux*, ou armures mobiles, qu'on peut visser aux extrémités des barreaux de fer doux de

l'électro-aimant. Ces armures permettent de faire varier la forme et l'étendue des surfaces pôlaires, de disséminer la

Fig. 385.

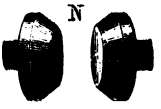


Fig. 386.

force magnétique sur une large surface, ou de la concentrer dans un espace très rétréci.

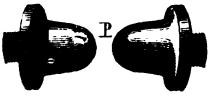


Fig. 387.

M (fig. 385) sont de gros disques de fer doux, de 4 à 5 centimètres d'épaisseur et de même diamètre que les bobines.

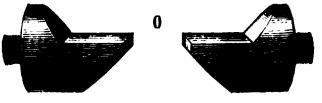


Fig. 388.

Quand ces disques sont vissés sur les barreaux de fer doux

de l'appareil, l'espace qui les sépare représente un *champ magnétique* de grande étendue.

Quand les disques M sont remplacés par les armures N (fig. 386), l'étendue du *champ magnétique* est moindre, et la force magnétique est disséminée sur des surfaces polaires plus petites.

Quant les cônes P (fig. 387) sont vissés sur les barreaux de fer doux de l'appareil, la force magnétique est concentrée à leurs extrémités arrondies.

Les armures O (fig. 388) sont très commodes pour étudier l'action du magnétisme sur les corps liquides.

§ Ier. — Action du magnétisme sur les corps solides.

M. Pouillet (1) a indiqué un moyen très simple de mettre en évidence l'action des pôles d'un aimant sur les corps solides. — Sur les extrémités horizontales des branches d'un électro-aimant en fer à cheval, disposé verticalement, on place une feuille mince de carton à laquelle on communique de légères vibrations en même temps qu'on laisse tomber à sa surface de la limaille de *fer* en poudre fine. Les particules métalliques se précipitent de tous côtés vers une circonférence qui correspond à l'arête terminale de chacune des faces polaires du barreau de l'électro-aimant, s'accumulent sur cette ligne et la dessinent avec une grande précision. — La feuille de carton étant disposée de la même manière, on substitue de la poudre de *bismuth* à la limaille de fer ; le métal, au lieu d'être *attiré* par le bord de chaque surface polaire de l'électro-aimant,

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1846, t. XXII, p. 144.

est *repoussé* en dehors et en dedans de ce bord. Sous cette influence *répulsive*, les particules de bismuth se réunissent pour dessiner deux circonférences concentriques et séparées par une bande étroite, complétement dépouillée de poussière métallique, qui correspond exactement à l'arête du barreau de fer doux de l'électro-aimant.

On peut encore fixer sur les surfaces polaires des armures coniques comme les pièces P de la figure 387. Dans ce cas, les particules de la limaille de *fer* se rassemblent sur les points de la feuille de carton qui correspond aux sommets des armures coniques, et forment autour de ces points des traînées divergentes. Les particules de *bismuth*, au contraire, s'éloignent des extrémités polaires, glissent sur la surface du carton, et se réunissent sur les circonférences de deux cercles dont les centres correspondent aux sommets des deux armures coniques.

Après avoir armé le grand électro-aimant de Ruhmkorff de ses deux pièces coniques de fer doux, faisons glisser les deux équerres E E', de manière que les extrémités polaires soient très rapprochées l'une de l'autre. Suspendons à un fil de soie sans torsion une sphère métallique C d'un diamètre supérieur à l'intervalle qui sépare les extrémités des armures (Fig. 389), plaçons cette sphère à une très faible distance de ces pièces polaires et fermons le circuit des bobines. — Si la sphère est en *fer*, elle est *attirée* et vient s'appliquer contre les extrémités des armures. — Si cette sphère est en *bismuth*, elle est *repoussée* par les pôles magnétiques, rejetée latéralement, et maintenue à une certaine distance des armures tant que le courant continue à passer dans les bobines.

M. Faraday a employé, dans ses recherches, un procédé d'expérimentation qui a l'avantage de rendre plus faciles les mouvements excités par l'aimant, et qui permet d'ob-

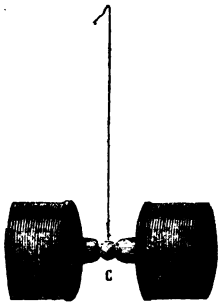


Fig. 389.

server avec beaucoup de précision les effets produits par des actions d'une très faible intensité.

Soient *a*, *b* (Fig. 390) les armures coniques d'un grand électro-aimant de Ruhmkorff. La ligne *ab* qui joint les sommets de ces pièces coniques passe par les pôles de l'électro-aimant, et prend le nom de *ligne axiale;* on appelle *ligne équatoriale* une perpendiculaire *cd* menée, dans un plan horizontal, sur le milieu de *ab*. Après avoir donné à un corps solide quelconque la forme d'une aiguille légère *ef*, suspendons cette aiguille, à l'aide d'un fil de soie sans torsion, entre les deux pôles *a*, *b*, de manière que son centre de suspension *g* coïncide avec l'entre-croisement de la *ligne axiale ab* et de la *ligne équatoriale cd*.

Si le corps est *paramagnétique*, la portion *eg* est plus fortement *attirée* par le pôle *a* que par le pôle *b*, la portion

fg, au contraire, est plus fortement *attirée* par le pôle *b* que par le pôle *a*, l'aiguille tourne dans un plan horizontal autour du point *g* et vient se placer dans la direction de la ligne *ab*. Cette position *axiale* est, pour tout corps *paramagnétique*, une position d'*équilibre stable;* il tend toujours à la reprendre, s'il en est écarté par une cause quelconque.

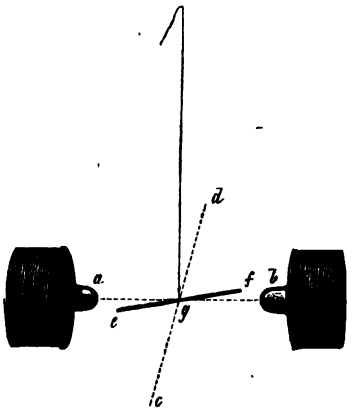


Fig. 390.

Si le corps est *diamagnétique*, la portion *eg* est plus fortement *repoussée* par le pôle *a* que par le pôle *b*, la portion *gf*, au contraire, est plus fortement *repoussée* par le pôle *b* que par le pôle *a*, l'aiguille tourne autour de son point de suspension et vient se placer dans la direction de la ligne *cd*. Cette position *équatoriale* est, pour tout corps *diamagnétique*, une position d'*équilibre stable*. — L'aiguille étant dans la position *équatoriale*, déplaçons-la parallèlement à elle-même de manière à la rapprocher de l'un des

pôles, immédiatement elle est *repoussée* et transportée, par un mouvement de totalité, vers la ligne *équatoriale*.

M. Faraday a pu s'assurer ainsi que tous les corps solides sont influencés par le magnétisme. Les uns, en très petit nombre, sont *attirés*, prennent la position *axiale* et se conduisent comme le *fer doux;* les autres, beaucoup plus nombreux, sont *repoussés*, prennent la position *équatoriale* et se conduisent comme le *bismuth*. Nous donnons, dans le tableau suivant, les noms des métaux dont les propriétés magnétiques ont été bien constatées. D'après les observations de M. Faraday, les métaux compris dans ces deux séries sont rangés dans un ordre tel, que chacun d'eux est plus fortement influencé par l'aimant que tous ceux qui le suivent.

Métaux paramagnétiques.		*Métaux diamagnétiques.*	
		Bismuth.	Argent.
Fer.	Cérium.	Antimoine.	Cuivre.
Nickel.	Titane.	Zinc.	Or.
Cobalt.	Palladium.	Étain.	Arsenic.
Manganèse.	Platine.	Cadmium.	Uranium.
Chrome.	Osmium.	Sodium.	Rhodium.
		Mercure.	Iridium.
		Plomb.	Tungstène.

D'après les derniers travaux de M. Verdet, la lanthane et le molybdène sont attirés par les aimants, et l'uranium doit passer de la liste des métaux diamagnétiques dans celle des métaux paramagnétiques. Le même physicien a constaté que le lithium et le glucinium sont diamagnétiques.

Indépendamment de l'action directrice dont nous avons parlé, M. Faraday a observé que les aiguilles de cuivre

suspendues entre les pôles d'un électro-aimant éprouvent des mouvements d'une autre nature. — Au moment où l'on *ferme* et au moment où l'on *ouvre* le circuit des bobines de l'électro-aimant, l'aiguille reçoit une impulsion qui dépend de sa position par rapport aux lignes *axiale* et *équatoriale*. Le sens et l'intensité de ces impulsions, la manière dont elles sont modifiées par la position et la forme de la masse de cuivre, tout prouve qu'elles sont dues à des courants d'*induction* développés dans l'aiguille métallique. D'ailleurs, le cuivre et les métaux bons conducteurs présentent seuls ces phénomènes; on ne les obtient ni avec le bismuth, dont le pouvoir conducteur est très faible, ni avec le verre pesant qui est un corps isolant et fortement diamagnétique. — Quand, après avoir fermé le circuit des bobines, on fait osciller une aiguille de cuivre entre les pôles d'un électro-aimant, les mouvements oscillatoires sont lents et s'amortissent très rapidement; il semble qu'ils s'effectuent dans un milieu plus dense. Si on tente la même expérience après avoir rompu le circuit; les oscillations s'exécutent comme à l'ordinaire. Ces effets sont évidemment dus aussi au développement de courants d'*induction* dans l'aiguille de cuivre qui, en oscillant, change de position par rapport aux pôles. A l'appui de cette interprétation, M. Faraday fait observer que les oscillations des aiguilles de verre et de bismuth ne sont nullement influencées par le magnétisme.

L'*attraction* et la *répulsion* exercée par les pôles d'un aimant est le fait simple et fondamental à l'aide duquel on peut, avec certitude, reconnaître un corps *paramagnétique* et un corps *diamagnétique*. La *direction* d'une

aiguille en présence d'un aimant est un phénomène complexe qui, sans doute, dépend de l'action des pôles eux-mêmes, mais qui peut être influencé par une foule de circonstances. M. OErstedt (1) a montré comment on peut faire varier cette *direction*, en donnant à l'aiguille une position plus ou moins élevée dans l'espace compris entre les plans des faces polaires rectangulaires, en suspendant son centre au-dessus des arêtes des pièces polaires et même en modifiant la forme de ces pièces. Ainsi, par exemple, supposons que les pièces polaires rectangulaires soient percées d'un canal horizontal et perpendiculaire à leurs faces en regard; une aiguille *diamagnétique*, placée entre leurs faces opposées, prend la position *axiale* et *paraît attirée* toutes les fois qu'elle est suspendue à la hauteur des ouvertures des deux canaux; au-dessus et au-dessous de ces ouvertures, elle est *repoussée* dans la position *équatoriale*. M. Thomson (2) a fait voir combien sont nombreuses et variées les circonstances qui peuvent influer sur la *direction définitive* d'une aiguille soumise à l'action des pôles d'un aimant. Mais, en même temps, il a prouvé que, dans tous les cas, les corps *diamagnétiques* sont transportés, conformément aux idées développées par M. Faraday, dans les points où l'action magnétique est au *minimum* d'intensité, tandis que les corps *paramagnétiques* sont attirés dans les points correspondants au *maximum* d'intensité de cette action.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1848, t. XXIV, p. 424.

(2) *Bibl. universelle de Genève*, 1851, t. XVI, p. 46; — 1853, t. XXIV, p. 360.

§ II. — Action du magnétisme sur les liquides.

Pour étudier l'action du magnétisme sur les liquides, on peut les enfermer dans des sphères de verre très minces, et les rapprocher de l'un des pôles d'un électro-aimant ; on trouve ainsi que les uns se conduisent comme le *fer*, sont *attirés* et sont *paramagnétiques*, tandis que les autres se conduisent comme le *bismuth*, sont *repoussés* et sont *diamagnétiques*. On peut aussi les placer dans des tubes de verre très minces et les suspendre entre les pôles d'un électro-aimant ; ce dernier mode d'expérimentation, employé par M. Faraday, lui a permis de constater que les liquides, comme les solides, sont tous influencés par le magnétisme. Les uns prennent la *position axiale* et sont *paramagnétiques*, les autres prennent la *position équatoriale* et sont *diamagnétiques*.

M. Plucker (1) a employé un procédé très ingénieux pour mettre en évidence l'action des pôles d'un aimant sur les liquides *paramagnétiques* et *diamagnétiques*. Sur

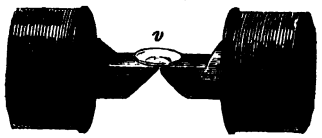


Fig. 391.

les extrémités polaires des armures de fer doux d'un électro-aimant, on place un verre de montre *v* (fig. 391),

(1) De La Rive, *Traité d'électricité*, t. I, p. 500.

dans lequel on verse une grosse goutte du liquide en expérience. Dès que le circuit des bobines est fermé, la goutte liquide se déforme et sa surface se recouvre d'éminences et de dépressions dont la forme, la position et la direction dépendent de la nature du liquide et de la distance qui sépare les pôles magnétiques. Les deux exemples suivants nous paraissent suffisants pour bien faire comprendre la nature des phénomènes dont la goutte liquide est le siége.

mn, *m'n'* (Fig. 392) représentent la projection horizontale des arêtes des surfaces polaires sur lesquelles est

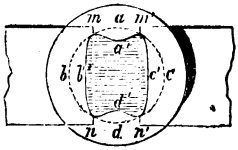


Fig. 392.

appuyé le verre de montre; ces arêtes sont à 23 millimètres l'une de l'autre. *abcd* est la section horizontale de la goutte liquide d'un *liquide paramagnétique*, quand le

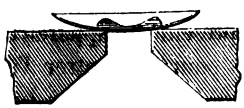


Fig. 393.

circuit est encore ouvert; *a'b'c'd'* est la section horizontale de cette même goutte, quand le circuit est fermé. On a représenté (Fig. 393) une section verticale pratiquée dans cette même goutte suivant la *ligne axiale*, quand le circuit

est fermé. L'inspection de ces deux figures montre que les molécules des *liquides paramagnétiques* sont *attirées* par les arêtes des surfaces polaires ; il résulte de ce mouvement des molécules que la surface du liquide est soulevée dans les points correspondants à ces arêtes, et déprimée dans les points intermédiaires.

Les déformations éprouvées par les liquides *diamagnétiques* sont de sens inverse, mais beaucoup moins prononcées. On a représenté (Fig. 394) la coupe verticale prati-

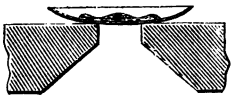


Fig. 394.

quée dans une goutte de *liquide diamagnétique* suivant la *ligne axiale ;* les arêtes des pièces polaires sont à 15 millimètres l'une de l'autre. La surface du liquide est déprimée dans les parties correspondantes à ces arêtes, et soulevée dans les parties intermédiaires. Les molécules des *liquides diamagnétiques* sont donc *repoussées* par les arêtes des surfaces polaires.

La figure 395 représente un appareil très commode, employé par M. Quet pour démontrer l'action du magnétisme sur les liquides. — CD est un tube de verre ouvert par les deux bouts. T, T′ sont deux règles de cuivre portées sur un pied P. Ces deux règles sont articulées en I ; la vis V permet de soulever ou d'abaisser à volonté l'extrémité correspondante de la règle T. On introduit dans le tube une goutte G du liquide à essayer.

On place (Fig. 396) le tube CD entre les deux armures O, O d'un électro-aimant et suivant la ligne *équatoriale*, de manière que la goutte G, tout entière hors du champ

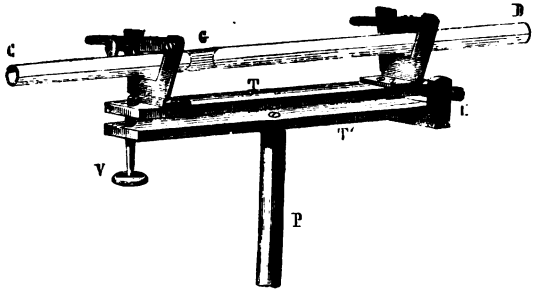


Fig 395.

magnétique, corresponde par son extrémité au plan vertical mené par les arêtes de ces armures. — Si le liquide est *paramagnétique*, on abaisse, avec la vis V,

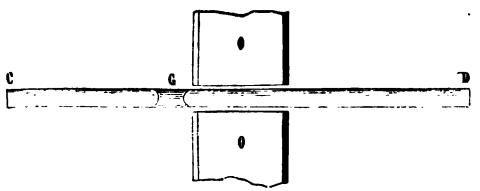


Fig. 396.

l'extrémité C du tube au-dessous du niveau de son extrémité D. — Si le liquide est *diamagnétique*, l'extrémité C du tube doit, au contraire, être plus élevée que son extrémité D.

Au moment où le circuit des bobines de l'électro-aimant

est fermé, la goutte liquide G entre en mouvement. — Quand le liquide est *paramagnétique*, la goutte est *attirée*, monte de C en D contrairement à l'action de la pesanteur, et s'arrête au milieu du champ magnétique. — Quand le liquide est *diamagnétique*, la goutte G est *repoussée*, et marche de D en C contrairement à l'action de la pesanteur.

§ III. — Action du magnétisme sur les gaz.

D'après les expériences faites en 1846, à Gênes, par le père Bancalari, et répétées par M. Zantedeschi, les pôles d'un aimant exercent une action *répulsive* sur la *flamme*

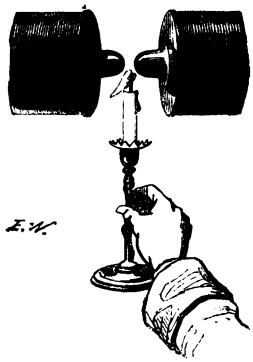


Fig. 397.

d'une lampe et d'une bougie. La figure 397 représente une bougie allumée entre les surfaces polaires coniques d'un électro-aimant. Tant que le circuit des bobines est ouvert, la flamme conserve sa position verticale; mais, au moment

où le circuit est fermé, la flamme est fortement *repoussée*, s'allonge horizontalement dans la direction de la *ligne équatoriale*, et persiste dans cette position tant que le courant continue à passer. Toutes les flammes éprouvent, à des degrés divers, le même genre d'influence. Ces effets sont à peine sensibles avec la flamme de l'hydrogène, et sont, au contraire, très prononcés avec la flamme des corps résineux.

En 1847, M. Faraday (1) étudia l'action du magnétisme sur les gaz. Il opéra d'abord en faisant passer des courants gazeux dans le voisinage des pôles d'un électro-aimant. Il s'assura ainsi que, *quel que fût le milieu gazeux environnant*, le courant d'*oxygène* était *constamment attiré*. L'oxygène se comportait donc, dans ces expériences, comme un corps *paramagnétique*. — Plus tard, M. Faraday reprit cette étude, en soumettant à l'action des pôles d'un aimant des bulles de savon remplies de divers gaz (2); selon la nature du fluide élastique employé, les bulles de savon étaient *attirées* ou *repoussées*. Les bulles remplies d'*oxygène* furent constamment *attirées*. — Enfin, dans une troisième série de recherches (3), il introduisit les gaz dans des ampoules de verre très minces; deux ampoules de mêmes dimensions, remplies l'une d'oxygène et l'autre d'azote, étaient fixées aux extrémités du levier d'une

(1) *Philosophical Magazine*, 3e série, 1847, t. XXXI, p. 401. — *Experimental Researches*, t. III, p. 467. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1852, t. XXXIV, p. 240.

(2) *Experimental Researches*, t. III, p. 183. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1852, t. XXXIV, p. 247.

(3) *Experimental Researches*, t. III, p. 187. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1852, t. XXXIV, p. 248.

balance de torsion suspendu lui-même au moyen d'un fil de soie sans torsion. Les deux pôles de l'électro-aimant étaient réunis par un double cône en fer doux, et les deux ampoules étaient amenées à égale distance du sommet commun des deux cônes. L'oxygène se montra fortement *paramagnétique*. — Dans une autre série d'expériences (1), M. Faraday a démontré que, sous l'influence du magnétisme, le volume des gaz n'éprouve pas de variation sensible.

M. Ed. Becquerel (2) s'est aussi occupé, mais postérieurement aux premiers travaux de M. Faraday, des propriétés magnétiques des gaz. Il a employé, dans ses recherches, une balance de torsion qui lui permettait de mesurer exactement l'intensité de l'action attractive ou répulsive des pôles magnétiques. Profitant de la propriété du charbon d'absorber et de condenser les gaz, il a recuit au rouge un cylindre de charbon de chêne, puis il a déterminé le sens et mesuré l'intensité de l'action des pôles d'un électro-aimant sur ce cylindre successivement suspendu dans le vide de la machine pneumatique et dans divers milieux gazeux. — D'après les résultats obtenus par M. Ed. Becquerel, l'hydrogène et l'azote ne sont pas sensiblement influencés; mais l'oxygène est *fortement paramagnétique*. L'air est *paramagnétique* aussi, quoique à un moindre degré; en raison de l'état à peu

(1) *Experimental Researches*, t. III, p. 169. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 243.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1849, t. XXVIII, p. 623; — 1850, t. XXXI, p. 198. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1850, t. XXVIII, p. 321; — 1851, t. XXXII, p 92.

près neutre de l'azote, les propriétés magnétiques de l'air doivent être rapportées à la présence de l'oxygène. Le protoxyde d'azote, l'acide carbonique, le gaz oléfiant et surtout le cyanogène sont *diamagnétiques*. M. Ed. Becquerel, tenant compte de la densité des gaz, a établi que l'action des pôles d'un aimant sur un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.

M. Plucker avait d'abord rangé l'oxygène parmi les corps *diamagnétiques*. Plus tard, il a reconnu (1) les propriétés *paramagnétiques* de ce gaz qu'il considère, en outre, comme doué d'un certain degré de *force coercitive*. D'après les recherches du même observateur, le bioxyde d'azote $AZ\,O^2$ est *fortement paramagnétique;* l'acide azoteux $AZ\,O^3$ est *paramagnétique* à l'état gazeux, et *diamagnétique* à l'état liquide ; l'acide hypo-azotique $AZ\,O^4$ est à peu près insensible à l'action du magnétisme à l'état gazeux, et assez *fortement diamagnétique* à l'état liquide.

§ IV. — Du pouvoir magnétique.

Avant de rendre compte des expériences entreprises dans le but de mesurer exactement l'intensité de l'action d'un aimant sur les corps, il est nécessaire de préciser le rôle que la chaleur et le milieu ambiant jouent dans ces phénomènes.

Influence de la chaleur. — M. Faraday, opérant avec de puissants électro-aimants, a démontré (2) que, si l'élé-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 342 et suivantes. — *Bibl. univers. de Genève*, 1851, t. XVIII, p. 246 ; — 1852, t. XIX, p. 102.

(2) *Bibl. univ. de Genève*, 1846, t. II, p. 145.

vation de température affaiblit considérablement les propriétés des métaux *paramagnétiques*, elle ne les fait jamais disparaître complétement. Des barreaux de fer doux et de nickel portés aux températures les plus élevées étaient encore *attirés;* il a obtenu des résultats de même nature avec des corps dans la composition desquels entraient le fer, le nickel, ou le cobalt. L'exactitude de ces faits a été vérifiée par M. Plucker (1). Il résulte des observations de M. Matteucci (2) que les propriétés magnétiques du fer doux augmentent jusqu'à une certaine température à partir de laquelle elles décroissent d'une manière considérable, sans jamais disparaître complétement; à l'état de fusion ignée le fer était encore *attiré* par un électro-aimant. Il a constaté que la chaleur exerce une influence du même genre sur les composés ferrugineux, et les rend moins sensibles à l'action des aimants. D'après M. Matteucci, les propriétés magnétiques du platine se conservent à des températures très élevées, et paraissent à peine diminuées par la fusion ignée.

L'élévation de température affaiblit aussi les propriétés des substances *diamagnétiques*. M. Plucker a trouvé (3) que, vers 250 degrés, température de fusion du métal, la répulsion exercée par le pôle d'un électro-aimant sur le bismuth éprouve une diminution considérable qui va croissant avec l'échauffement de la masse. Les propriétés du soufre à une température supérieure à son point de fusion, sont à peine altérées, et celles du mercure n'éprou-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1850, t. XXIX, p. 142.
(2) *Cours spécial sur l'induction*, etc. Paris, 1854, p. 221.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXIX, p. 143.

vent aucune variation entre *zéro* et 300 degrés. M. Matteucci (1) a imaginé une expérience très élégante pour mettre en évidence l'influence de la chaleur sur le *diamagnétisme* du bismuth. Il suspend à un fil de cocon une tige très légère de bois, et place à une de ses extrémités une cuiller de chaux caustique dans laquelle il répand quelques traces à peine visibles de colchotar. Lorsque le circuit des bobines de l'électro-aimant est fermé, la cuiller est *attirée* et l'aiguille se place *axialement*. Il remplit ensuite la cuiller avec du bismuth, la cuiller est alors *repoussée*, et l'aiguille se place *équatorialement*. Il rompt le circuit et chauffe la cuiller avec une lampe à alcool. Lorsque le bismuth est fondu, il ferme de nouveau le circuit, la cuiller est alors *attirée* et l'aiguille se place *axialement*. Au moment où le bismuth refroidi se solidifie, la cuiller est brusquement *repoussée* et l'aiguille reprend la position *équatoriale*. M. Matteucci a constaté en outre que les propriétés magnétiques du phosphore, de l'acide stéarique et du soufre n'éprouvent qu'une très faible diminution à la température de fusion de ces corps.

En 1847, M. Faraday (2) montra que l'élévation de température affaiblit les propriétés magnétiques de l'*air*. Ces expériences tendraient à établir que, pour les gaz comme pour les solides, l'intensité de l'action *attractive* ou *répulsive* de l'aimant dépend de la température. M. Ed. Becquerel (3) a repris l'examen de cette question intéressante; ses observations sur l'oxygène portent à

(1) *Cours spécial sur l'induction*, etc. Paris, 1854, p. 223.
(2) *Experimental Researches.*, t. III, p. 473.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1855, t. XLIV, p. 221.

penser que, si à mesure que leur température s'élève les gaz deviennent moins sensibles à l'action des aimants, cela tient uniquement à la diminution de leur densité, et non à une altération de leurs propriétés spécifiques.

Influence du milieu ambiant sur les phénomènes déterminés par le magnétisme. — Dès ses premières recherches (1) sur l'action du magnétisme, M. Faraday découvrit un fait d'une très haute importance : il prouva que, suivant la nature du milieu ambiant, un même corps peut être *attiré* ou *repoussé* par les pôles d'un électro-aimant. Prenons, par exemple, une *dissolution très étendue de protosulfate de fer* et enfermons-la dans un tube de verre très mince. Si ce tube est suspendu horizontalement *dans l'air*, entre les pôles d'un électro-aimant, le liquide se conduit comme un corps *paramagnétique*, et le tube prend la *position axiale*. — Entre les pôles de l'électro-aimant plaçons une petite cuve de verre pleine d'*eau*, et disposons l'expérience de manière que le tube rempli de la dissolution très étendue de protosulfate de fer soit complétement immergé dans l'eau ; la dissolution de protosulfate se montre plus *fortement paramagnétique* que dans l'air, et le tube prend la *position axiale ;* les choses se passent de même si l'on remplace l'*eau* par de l'*alcool*. — En place de l'eau, versons dans la cuve une dissolution de protosulfate de fer au *même degré de concentration* que celle qui est dans le tube ; dans ce cas, le tube devient complétement *indifférent* à l'action du magnétisme. — Enfin, versons autour du tube une dissolution

(1) *Bibl. univers. de Genève*, 1846, t. II, p. 148.

du protosulfate de fer *plus concentrée* que celle qu'il contient; alors la dissolution la *plus étendue* se conduit comme un corps *diamagnétique*, et le tube prend la position *équatoriale*.

M. Faraday a obtenu des résultats de même nature en suspendant *verticalement*, en face des pôles d'un électro-aimant, le tube de verre mince rempli de la dissolution très étendue de protosulfate de fer. — Dans l'air, dans l'eau et dans l'alcool, le tube était *attiré;* dans une dissolution de protosulfate de fer au même degré de concentration, le tube était *indifférent* à l'action des pôles; enfin, dans une dissolution plus concentrée de protosulfate de fer, le tube était *repoussé*. Tous les observateurs qui, depuis M. Faraday, ont fait des expériences dans cette direction, se sont accordés pour reconnaître l'exactitude de ces résultats, et l'importance du rôle du milieu ambiant dans les phénomènes déterminés par l'action du magnétisme.

Comme le fait observer M. Faraday, les résultats précédents portent naturellement à penser que tous les corps sont *paramagnétiques* à des degrés divers, et qu'il n'y a pas réellement de corps *diamagnétique*. Dès lors, l'*attraction* et la *répulsion*, déterminées par le voisinage des pôles d'un aimant, ne traduiraient pas une *propriété spécifique* des corps, mais une simple *différence entre les actions de même nature* exercées par les pôles magnétiques sur chacun de ces corps et sur le milieu ambiant. En d'autres termes, un corps quelconque mis en présence d'un aimant serait *attiré* ou *repoussé*, dirigé *axialement* ou *équatorialement*, non pas parce qu'il serait lui-même, et d'une manière absolue, *paramagnétique* ou *diamagnétique*, mais

uniquement parce qu'il serait plongé dans un milieu *moins* ou *plus paramagnétique* que lui. Cette manière d'interpréter les phénomènes, repoussée par la grande majorité des physiciens qui, avec M Faraday, considèrent les substances *attirées* par les aimants et les substances *repoussées* comme douées de propriétés *distinctes* et *opposées*, a été adoptée par M. Ed. Becquerel (1).

M. Ed. Becquerel admet que tous les corps de la nature sont, à des degrés divers, magnétiques à la manière du fer doux. Pour lui, les phénomènes d'*attraction* et de *répulsion* doivent être rapportés à l'action d'une seule et même force ; dans un milieu *indifférent* tous les corps seraient *attirés ;* les mouvements exécutés par les corps placés en présence d'un aimant sont des effets complexes résultant des deux actions *attractives* exercées par l'aimant sur les corps en expérience et sur le milieu ambiant.

M. Ed. Becquerel appelle *magnétisme spécifique* d'un corps quelconque la force avec laquelle l'*unité* de volume de ce corps est *attirée* par un centre magnétique dont l'intensité est *un* et agissant à l'*unité* de distance.

Dans cette théorie, lorsqu'un centre magnétique est placé dans un fluide quelconque, les molécules du fluide sont *attirées* dans toutes les directions ; quand l'équilibre existe, chaque tranche du fluide supporte une *pression* et prend une *densité* d'autant plus considérables qu'elle est plus rapprochée du centre magnétique. Tout corps plongé dans ce fluide est donc soumis à une *attraction* dont l'intensité

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1850, t. XXVIII, p. 283; — 1851, t. XXXII, p. 68; — 1855, t. XLIV, p. 209.

dépend de son volume, de son magnétisme spécifique et de sa distance au centre magnétique ; mais, d'un autre côté, il éprouve, de la part du milieu ambiant, une *poussée* de sens inverse dont l'intensité dépend aussi de la distance, du magnétisme spécifique et du volume du fluide déplacé. Ces deux actions représentent deux forces directement opposées et appliquées au même point du corps. Comme, d'ailleurs, le volume du liquide déplacé est égal au volume du corps, la résultante ou la différence de ces deux forces est nécessairement proportionnelle à la différence des magnétismes spécifiques du corps et du fluide ambiant. La *grandeur* et le *signe* de cette résultante déterminent l'*intensité* et le *sens* de l'action du centre magnétique sur le corps en expérience.

On se trouve donc ainsi conduit à admettre que le magnétisme développe, dans les masses gazeuses soumises à son influence, des pressions mécaniques assez intenses pour mettre en mouvement des corps d'une densité aussi considérable que celle des métaux. Il est au moins difficile de concilier cette conséquence forcée de la théorie avec l'invariabilité bien démontrée du volume des gaz exposés à l'action des pôles des électro-aimants les plus puissants.

Ce n'est pas tout, un barreau de bismuth est presque aussi fortement repoussé dans le *vide* que dans l'*air*. Pour répondre à cette difficulté, il ne suffit pas de dire que sans doute l'*éther* est plus *magnétique* que le bismuth ; il faudrait commencer par prouver que le magnétisme peut déterminer des *pressions mécaniques* dans l'*éther*, et puis expliquer comment ces pressions sont capables de *communiquer un mouvement à des masses métalliques*.

Nous avons déjà dit qu'en présence des faits acquis, on doit admettre, avec M. Faraday, que l'aimant peut agir de deux manières différentes sur la matière. Certains corps sont *attirés*, ils sont *paramagnétiques ;* d'autres corps sont *repoussés*, ils sont *diamagnétiques*. Cette attraction et cette répulsion magnétiques sont dues à l'action de deux forces distinctes et de *sens contraires*. Les mouvements exécutés dans le *vide absolu* dépendraient uniquement de l'influence des pôles de l'aimant sur les substances essayées, et traduiraient exactement la nature de leurs propriétés magnétiques. Le mouvement d'un corps plongé dans un milieu quelconque est, dans tous les cas, un effet produit par la résultante des actions, de même sens ou de sens contraires, exercées par les pôles de l'aimant d'une part sur le corps en expérience, d'autre part sur le milieu ambiant.

Considérons l'*attraction* comme une force *positive*, et la *répulsion* comme une force *négative*. Quand un corps plongé dans un fluide est mis en présence d'un aimant, l'effet observé ne traduit ni l'action de cet aimant sur le corps, ni son action sur le fluide, mais la *différence algébrique* des actions supportées par le corps et par un égal volume du fluide qui l'entoure.

Soient f et f' les valeurs absolues des actions supportées par un corps et par le volume du fluide qu'il déplace. Il est facile de voir comment, à l'aide des considérations précédentes, on peut se rendre compte de tous les faits fournis par l'expérience.

1° Le corps en expérience et le fluide ambiant sont tous les deux *paramagnétiques*. Dans ce cas f et f' sont deux

forces *positives;* leur différence est $(f-f')$.—Si f' est plus petit que f, $(f-f')$ est une quantité positive mais plus petite que f; le corps se conduit toujours comme une substance *paramagnétique*, seulement il est moins fortement *attiré* que dans le vide. — Si f' est égal à f, l'expression $(f-f')$ est égale à *zéro;* le corps n'est ni *attiré* ni *repoussé*, il paraît *indifférent.* — Si f' est plus grand que f, $(f-f')$ est une quantité négative; le corps est *repoussé* et, quoiqu'il soit *paramagnétique*, il se conduit, dans ce milieu, comme une substance *diamagnétique.*

2° Le corps en expérience et le fluide ambiant sont tous les deux *diamagnétiques.* Dans ce cas, f et f' sont deux forces *négatives;* leur différence est $(f'-f)$. —Si f' est plus petit que f, $(f'-f)$ est une quantité négative; le mouvement du corps ne change pas de signe, l'action est toujours *répulsive*, mais moins intense que dans le vide.— Si f' est égal à f, l'expression $(f'-f)$ est égale à *zéro;* le corps n'est ni *attiré* ni *repoussé*, il paraît *indifférent.* — Si f' est plus grand que f, $(f'-f)$ est une quantité positive; le corps est *attiré* et, quoiqu'il soit *diamagnétique*, il se conduit, dans ce milieu, comme une substance *paramagnétique.*

3° Le corps en expérience est *paramagnétique*, et le fluide ambiant est *diamagnétique.* Dans ce cas, f est une force *positive* et f' une force *négative;* leur différence est une quantité toujours *positive* $(f+f')$. Évidemment, le corps est toujours *attiré*, et même *plus fortement* que s'il était dans le *vide.* — Son pouvoir magnétique est simplement exalté.

4° Le corps en expérience est *diamagnétique* et le fluide ambiant est *paramagnétique.* Dans ce cas, f est une force

négative et f' une force *positive;* leur différence est toujours une quantité *négative* — $(f+f')$. Dès lors, le corps est toujours *repoussé*, et même *plus fortement* que s'il était dans le *vide*. — Dans ce cas encore, son pouvoir magnétique est simplement exalté.

Détermination du pouvoir magnétique des corps. — Le pouvoir *magnétique* d'un corps est la force *attractive* ou *répulsive* avec laquelle un centre magnétique, d'intensité égale à l'*unité* et placé à l'*unité* de distance, agit sur l'*unité* de volume de ce corps. — MM. Ed. Becquerel (1), Plucker (2) et Faraday (3) ont successivement publié des travaux importants sur la détermination des pouvoirs magnétiques des corps.

Dans ses recherches, M. Ed. Becquerel a employé la balance de torsion. Les corps solides, taillés en aiguilles de longueur *constante* et de *même* diamètre, étaient suspendus entre les pôles d'un puissant électro-aimant, au moyen d'un fil d'argent de 45 *millièmes* de millimètre de diamètre. Dans chaque essai, on déterminait la torsion qu'il fallait imprimer à ce fil pour maintenir l'aiguille à une distance angulaire *constante* de la ligne des pôles. Le sens de la torsion imprimée au fil indiquait si l'action de l'aimant était attractive ou répulsive.

Par des essais préalables, M. Ed. Becquerel s'est assuré

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXVIII, p. 283; — 1851, t. XXXII, p. 68; — 1855, t. XLIV, p. 209.

(2) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXIX, p. 129; — 1852, t. XXXIV, p. 342.

(3) *Experimental Researches*, t. III, p. 497. — *Biblioth. univ. de Genève*, 1853, t. XXIII, p. 105.

que la répulsion d'une substance diamagnétique placée à une distance fixe du pôle magnétique est régie par la même loi que l'attraction d'une substance paramagnétique. Dans l'un comme dans l'autre cas, l'action de l'électro-aimant est proportionnelle au carré de l'intensité magnétique du barreau, ou au carré de l'intensité du courant qui traverse les bobines. L'exactitude de ces faits a été vérifiée par M. Tyndall (1). — En plaçant un rhéomètre dans le circuit des bobines, il est toujours possible de tenir compte de l'intensité du courant transmis et, par suite, de rendre les résultats indépendants des variations d'intensité des pôles magnétiques de l'électro-aimant.

Les corps solides étant tous taillés en aiguilles de même longueur et de même diamètre, les torsions imprimées à un fil suspenseur pour les maintenir à une distance angulaire *constante* sont évidemment proportionnelles à leurs pouvoirs magnétiques *dans l'air*.

Pour les liquides, M. Becquerel mesure l'action d'un aimant sur un même corps solide plongé successivement dans l'air et dans divers liquides. A l'aide de ces résultats, il est facile de calculer les pouvoirs magnétiques des liquides *dans l'air*.

M. Becquerel a rapporté tous les pouvoirs magnétiques des corps solides et liquides à celui de l'eau *dans l'air*. L'eau étant *repoussée* dans le *vide*, son pouvoir est *négatif* et a été pris égal à —1.

Par l'emploi de la même méthode, M. Ed. Becquerel a déterminé les pouvoirs magnétiques des divers gaz par rapport à l'*eau*.

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1851, t. XVIII, p. 211.

Pour mesurer l'action d'un centre magnétique sur les diverses substances, M. Plucker a employé une balance ordinaire, très sensible, dont toutes les pièces sont en verre, et dont les plateaux sont formés avec des verres de montre. Les liquides étaient directement placés dans l'un des plateaux de la balance ; les solides étaient préalablement ramenés à l'état de poudre très fine. Le plateau destiné à recevoir les corps en expérience occupait toujours la même position par rapport aux surfaces polaires d'un fort électro-aimant. M. Plucker agissait sur des volumes égaux des diverses substances ; dans chaque expérience, il exécutait deux pesées, l'une avant que le circuit des bobines de l'électro-aimant fût fermé, l'autre pendant que le courant traversait le circuit des bobines. La différence des poids nécessaires pour équilibrer, dans ces deux circonstances, le corps déposé dans l'un des plateaux représentait nécessairement l'intensité de l'action *attractive* ou *répulsive* de l'électro-aimant sur un volume connu de ce corps. Les nombres ainsi obtenus, corrigés d'ailleurs de l'effet produit sur le plateau de verre de la balance, sont évidemment proportionnels aux pouvoirs magnétiques des diverses substances essayées, à *volume égal* et *dans l'air*.

De ses expériences sur des mélanges contenant de la graisse et de la limaille de fer dans des proportions déterminées, M. Plucker a déduit que l'intensité de l'action d'un aimant sur un corps dont les particules sont uniformément réparties, est proportionnelle à la masse ou au poids de ce corps. D'ou il résulte que, pour lui, l'action d'un centre magnétique ne doit pas être rapportée au *volume*,

mais au *poids* des substances essayées. M. Plucker, après avoir mesuré, à la balance, l'action *attractive* ou *répulsive* M d'un électro-aimant sur un volume déterminé d'un corps, divise M par le poids P de ce même volume du corps dans l'air et hors de la présence de l'électro-aimant. La quantité M est affecté du signe + ou du signe — suivant que la substance essayée est *attirée* ou *repoussée;* dès lors, le rapport $\frac{M}{P}$ est une quantité *positive* ou *négative* qui, dans les idées de M. Plucker, représente le *magnétisme spécifique* de la substance en expérience.

M. Faraday a publié un travail très important sur la détermination des pouvoirs magnétiques sous *volume égal* et *rapportés au vide ;* il a employé la balance de torsion comme moyen de mesure. Le fil suspenseur était un fil de platine de 60 centimètres de longueur et assez fin pour qu'*un* mètre de ce fil ne pesât que 90 milligrammes. Dans chaque expérience, il mesurait le degré de torsion qu'il fallait imprimer au fil suspenseur pour maintenir la substance essayée en présence des armures d'un puissant électro-aimant, et à une distance *constante* de 15 millimètres; une lunette fixe servait à déterminer cette position avec la plus grande exactitude.

Ne pouvant pas entrer dans les détails du procédé expérimental suivi par M. Faraday, nous donnons, dans le tableau suivant, les résultats de ses recherches. Les nombres relatifs aux corps *paramagnétiques* ou *attirés* sont affectés du signe +; les nombres relatifs aux corps *diamagnétiques* ou *repoussés* sont affectés du signe —.

TABLEAU *des pouvoirs magnétiques des corps sous volume égal et rapportés au vide.*

Proto-ammoniure de cuivre	+	134,83	Camphre	—	82,59
Per-ammoniure de cuivre	+	119,83	Camphine	—	82,96
Oxygène	+	17,50	Huile de lin	—	85,56
Air	+	3,40	Huile d'olive	—	85,60
Gaz oléfiant	+	0,60	Cire	—	86,73
Azote	+	0,30	Acide azotique	—	87,96
Vide		0,00	Eau	—	96,60
Gaz acide carbonique		0,00	Solution d'ammoniaque	—	98,50
Hydrogène	—	0,10	Bisulfide de carbone	—	99,64
Ammoniac (gaz)	—	0,50	Solution saturée de nitre	—	100,08
Cyanogène	—	0,90	Acide sulfurique	—	104,47
Verre	—	18,20	Soufre	—	118,00
Zinc pur	—	74,60	Chloride d'arsenic	—	121,73
Éther	—	75,30	Borate de plomb fondu	—	136,60
Alcool absolu	—	78,70	Phosphore	—	»
Huile essentielle de citron	—	80,00	Bismuth	—	1967,60

§ V. — Influence de l'état moléculaire des corps.

M. Faraday (1) avait remarqué que l'état de cristallisation exerce une influence considérable sur la *direction* des masses de bismuth placées en présence des pôles d'un aimant. A peu près en même temps, M. Plucker (2) déduisait de ses observations qu'il existe toujours une relation entre l'axe de cristallisation et la position d'équilibre que les substances cristallisées prennent entre les pôles d'un aimant. Malgré tous leurs efforts, ces deux

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1849, t. XII, p. 89. — *Experimental Researches*, t. III, p. 83.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXIX, p. 145.

savants physiciens n'étaient pas parvenus à découvrir les véritables causes de ces phénomènes singuliers, en contradiction apparente avec les effets observés sur des substances amorphes.

Une étude approfondie de cette question a permis à MM. Tyndall et Knoblauch (1) de dissiper ces obscurités, et de faire rentrer ces faits dans les lois connues des actions magnétiques. Ils ont d'abord établi par des expériences nombreuses que, si les molécules d'un corps sont plus rapprochées dans une certaine direction que dans toute autre, cette direction de plus grande condensation de la matière est aussi celle suivant laquelle les forces magnétiques agissent avec le plus d'intensité. Par conséquent, lorsque un corps présentant cette disposition moléculaire est placé entre les pôles d'un électro-aimant, et que la ligne de plus grande condensation ou de plus grande action magnétique peut tourner dans un plan horizontal autour du point de suspension, ce corps doit, quelle que soit d'ailleurs sa forme, se placer dans une position d'équilibre stable telle que la ligne de plus grande condensation soit dirigée *axialement* si la substance est *paramagnétique*, et *équatorialement* si elle est *diamagnétique*. Citons quelques expériences à l'appui de ce principe.

Arrosons de la poudre de *carbonate de fer* avec de l'eau gommée, pour lier les particules entre elles et en faire une pâte consistante; en pressant fortement cette pâte entre deux morceaux de carton, nous obtiendrons un disque

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1850, t. XIII, p. 219; — 1851, t. XVI, p. 177, et t. XVIII, p. 211 et 215. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXVI, p. 375.

mince D (Fig. 398). Il est évident que les particules *paramagnétiques* de carbonate de fer ne sont pas réparties uniformément dans toute la masse du disque, et qu'elles sont plus rapprochées dans le sens de son épaisseur que dans toute autre direction. Bien que le carbonate de fer soit *paramagnétique*, ce disque suspendu verticalement entre les pôles d'un aimant est dirigé avec force et ses faces se placent *équatorialement* comme s'il était *repoussé*. Cette répulsion n'est qu'apparente, car, dans cette position du disque, l'axe de plus grande condensation des particules *paramagnétiques* de carbonate de fer, ou de plus grande attraction magnétique, est parallèle à la *ligne axiale*.

Fig. 398.

Supposons maintenant que le disque soit formé avec de la poudre de bismuth arrosée d'eau gommée. Suspendu verticalement entre les pôles d'un aimant, ce disque est toujours dirigé avec force, mais ses faces se placent *axialement* comme si le bismuth était *attiré*. Dans ce cas, l'attraction n'est qu'apparente, car, dans cette position du disque, l'axe de plus grande condensation des particules *diamagnétiques* de bismuth, ou de plus grande répulsion magnétique, est parallèle à la ligne *équatoriale*.

Qu'il soit formé avec de la poudre de carbonate de fer ou avec de la poudre de bismuth, si le disque est suspendu horizontalement (Fig. 399), l'observation montre qu'il est indifférent à l'action des pôles de l'aimant. Ce résultat était facile à prévoir; en effet, l'axe de plus grande condensation des particules, ou de plus grande action

magnétique, étant dans le prolongement du fil suspenseur, il n'y a pas de raison pour que le disque tourne dans un sens plutôt que dans un autre.

M. Tyndall a agi ensuite sur des cubes de bismuth qu'il comprimait tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Dans tous les cas, les cubes étaient dirigés de manière que la ligne de plus grande condensation des molécules coïncidât avec la ligne *équatoriale*.

Fig. 399.

M. Matteucci (1) a fait un grand nombre d'expériences qui sont parfaitement d'accord avec les précédentes.

Dans les recherches de ce genre, il faut avoir soin d'agir avec des surfaces polaires planes et larges ; quand les pôles magnétiques se terminent en cônes, l'action locale de ces pôles sur les surfaces très voisines du corps essayé produit des attractions ou des répulsions perturbatrices, qui peuvent l'emporter sur l'influence éprouvée par l'axe de plus grande condensation.

Les corps dont la texture est fibreuse doivent nécessairement présenter des phénomènes du même genre, puisque la condensation des molécules est plus considérable dans le sens des fibres que dans toute autre direction. — Ainsi, suspendons horizontalement, entre les pôles d'un aimant, un cylindre d'*ivoire*, substance fibreuse et *diamagnétique*. Quelle que soit la direction de son grand axe par rapport à celle des fibres, le cylindre est dirigé, et

(1) *Cours spécial sur l'induction*, etc. Paris, 1854, p. 145 et suiv.

s'arrête toujours dans une position d'équilibre stable telle que les fibres sont perpendiculaires à la *ligne axiale* et parallèles à la *ligne équatoriale*. — Si, les fibres étant parallèles au grand axe, le cylindre est suspendu verticalement, le système est *indifférent* à l'action des pôles.— Les morceaux de *gutta-percha*, substance *diamagnétique* rendue fibreuse par la préparation, se conduisent absolument comme les cylindres d'*ivoire*.

Dans une plaque métallique, découpons des lames rectangulaires et carrées, et associons-les de manière à

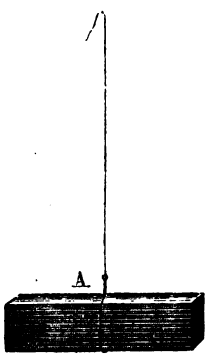


Fig. 400.

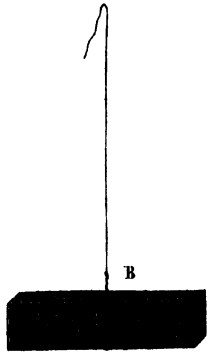


Fig. 401.

former les prismes A, B, C (Fig. 400, 401, 402). Dans ces prismes, les lignes de plus grande condensation des molécules et de plus grande action attractive ou répulsive de l'aimant, sont évidemment parallèles aux surfaces des lames associées. Lorsque ces prismes sont suspendus horizontalement entre les pôles d'un aimant, ils tournent autour de leur point de suspension, et se fixent définitive-

ment dans la position indiquée par l'axe de plus grande condensation des molécules. En effet :

Si les plaques sont *paramagnétiques*, le grand axe des prismes A et B se place *axialement*, le grand axe du prisme C se place *équatorialement*.

Si les plaques sont *diamagnétiques*, le grand axe des prismes A et B se place *équatorialement*, le grand axe du prisme C se place *axialement*.

En définitive, pour ces prismes composés de lames juxtaposées, la position d'équilibre n'est pas commandée par leur axe de figure, mais par la direction des lames

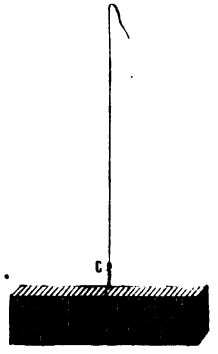


Fig. 102.

associées; ces lames se placent parallèlement à la *ligne axiale* quand elles sont *paramagnétiques*, et parallèlement à la *ligne équatoriale* quand elles sont *diamagnétiques*.

Ces exemples sont suffisants pour montrer les rapports qui existent entre la texture d'un corps et la position d'équilibre qu'il prend lorsqu'il est suspendu entre les pôles d'un aimant. Ils prouvent, en outre, que

l'aimant agit toujours sur les particules des corps par *attraction* quand ils sont *paramagnétiques*, et par répulsion quand ils sont *diamagnétiques*.

Par leur texture, les cristaux ressemblent aux prismes des Figures 400, 401, 402, composés de lames superposées. Leurs molécules ne sont pas uniformément réparties dans tous les sens; parallèlement aux surfaces de clivage, elles sont plus rapprochées que dans toute autre direction. Par conséquent, les masses cristallisées placées entre les pôles d'un aimant ne doivent pas être également sollicitées dans tous les sens. L'action attractive ou répulsive de l'aimant doit, comme la condensation moléculaire, atteindre son *maximum* dans une direction parallèle aux surfaces de clivage. A l'aide de ces considérations fort simples, les prétendues anomalies des phénomènes magnéto-cristallins s'expliquent avec la plus grande facilité, et, pour les masses cristallines comme pour les masses amorphes, tout se ramène à une *attraction* ou à une *répulsion* des particules matérielles. L'observation prouve en effet que :

Quand une aiguille taillée dans une masse cristalline est suspendue entre les pôles d'un aimant, la position d'équilibre stable qu'elle prend ne dépend absolument que de la direction des surfaces de clivage, c'est-à-dire de l'axe de plus grande condensation des molécules ou de plus grande action de l'aimant. Cette position est toujours telle que les surfaces de clivage se placent parallèlement à la *ligne axiale* si le cristal est *paramagnétique*, et parallèlement à la *ligne équatoriale* si le cristal est *diamagnétique*.

§ VI. — De la polarité diamagnétique.

Pour se rendre compte des actions exercées par un aimant sur la matière pondérable, MM. Poggendorff, Reich, Plucker et beaucoup d'autres physiciens, admirent de très bonne heure que les corps en présence d'un aimant peuvent prendre deux espèces de *polarité*. — Nous savons que dans le cas d'une substance *attirée*, comme le fer doux, les pôles développés par influence sont distribués de telle manière que les extrémités les plus rapprochées de l'aimant et du corps soumis à son action sont des *pôles de noms contraires :* c'est la *polarité paramagnétique*. — La manière de voir adoptée par ces physiciens conduit à admettre que, dans le cas d'une substance *repoussée*, comme le bismuth, les extrémités les plus rapprochées de l'aimant et du corps influencé représentent des *pôles de même nom :* ainsi la *polarité diamagnétique* serait inverse de la *polarité paramagnétique*.

M. Poggendorff, en étudiant l'action d'une aiguille aimantée très faible sur les extrémités d'un barreau de bismuth placé équatorialement entre les pôles d'un électro-aimant ; M. Plucker, en plaçant équatorialement un barreau de fer doux au-dessus d'un barreau de bismuth soumis à l'action des pôles d'un électro-aimant, et M. Reich, en faisant agir à la fois les deux pôles de *noms contraires* de deux aimants sur la même extrémité d'un barreau de bismuth, avaient observé des faits favorables, du moins en apparence, à l'idée de l'existence d'une *polarité diamagnétique*. MM. Faraday et Thomson sou-

mirent les conditions de ces expériences à une analyse rigoureuse, et montrèrent que les effets constatés s'expliquaient très bien par une modification survenue dans le champ des forces magnétiques, sans qu'on eût besoin de recourir à la *polarité diamagnétique*.

M. Weber (1) envisagea cette importante question d'un autre point de vue. Sur la surface polaire d'un puissant électro-aimant de force constante, il plaça une bobine en communication avec un galvanomètre très sensible, et un cylindre de bismuth dans la bobine. — Toutes les fois que le cylindre de bismuth était *introduit* ou *retiré*, le circuit de la bobine était traversé par un courant instantané; ces courants étaient évidemment le résultat d'une action inductrice analogue à celle qu'aurait exercée un cylindre de fer doux au moment de son introduction et au moment de sa sortie. Mais, d'après les observations de Weber, le *sens* des courants induits développés par le bismuth est *inverse* de celui des courants produits par un cylindre de fer doux placé dans les mêmes conditions. Ces expériences remarquables semblaient avoir définitivement établi que le bismuth et les métaux *diamagnétiques* prennent, en présence d'un aimant, une *polarité analogue* et *contraire* à celle du fer doux et des autres métaux *paramagnétiques*.

En 1850, M. Faraday (2) reprit l'examen de cette question. D'abord il montra que les effets d'induction déterminés dans les hélices par les métaux mis

(1) *Ann. der Physik*, 1848, t. LXXIII ; — 1852, t. LXXXVII.

(2) *Experimental Researches*, t. III, p. 137. — *Biblioth. univers. de Genève*, 1851, t. XVI, p. 89.

en mouvement en présence des aimants, et observés par M. Weber, augmentent avec la conductibilité des métaux et ne sont point en rapport avec leur *pouvoir magnétique*. Ainsi, le cuivre, l'or et l'argent agissent avec beaucoup de force, tandis qu'avec l'antimoine et le bismuth, on n'obtient pas de phénomène appréciable. Enfin, M. Faraday fit voir que les courants d'induction développés dans les métaux *diamagnétiques* alternativement rapprochés et éloignés du pôle d'un aimant, suffisent pour expliquer les résultats de M. Weber, et que, par conséquent, les expériences de ce dernier physicien ne prouvent nullement l'existence d'une *polarité diamagnétique*.

En 1851, M. Verdet (1) publia un beau travail sur les phénomènes d'induction développés par les mouvements des métaux *paramagnétiques* et *diamagnétiques* en présence des pôles d'un électro-aimant et d'une forte hélice électrodynamique. D'expériences très précises et conduites avec son habileté ordinaire, il tira les deux conclusions suivantes :

1° Il est impossible d'expliquer les phénomènes par une induction *diamagnétique* dont les lois seraient contraires à celles de l'induction développée par les métaux *paramagnétiques*.

2° On rend compte de tous les faits par les lois de l'induction ordinaire, pourvu qu'on ait égard à l'influence du temps, par laquelle M. Faraday a expliqué le magnétisme de rotation.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1851, t. XXXI, p. 187.

Tel était l'état de la question quand M. Tyndall a fait connaître les résultats de ses expériences (1). L'appareil dont il s'est servi dans ses recherches lui avait été fourni par M. Weber lui-même.

BDB'D' (Fig. 403) est le contour d'une cage de bois dont la paroi antérieure a été enlevée, et dont la paroi postérieure sert à maintenir toutes les pièces de l'appareil. Cette paroi postérieure, au moyen de deux grosses chevilles de laiton enfoncées dans les trous C, C', est solidement fixée à une maçonnerie. V, V' sont deux roues de bois de buis taillées en gorge; le mouvement de l'une d'elles est transmis à l'autre au moyen d'un cordon SS'. Deux cylindres *ic*, *op*, de la substance à essayer, sont fixés à ce cordon; quand les roues sont en mouvement, le cylindre *ic* monte pendant que le cylindre *op* descend, et réciproquement. HE et H'E' sont deux hélices de fil de cuivre recouvert de soie, et enroulé autour de deux gaînes de laiton dont les extrémités supérieures dépassent les hélices de H en G et de H 'en G'. La longueur commune de ces hélices HE, HE', est de 483 millimètres, leur diamètre intérieur de 18 millimètres, et leur diamètre extérieur de 33 millimètres; leurs centres

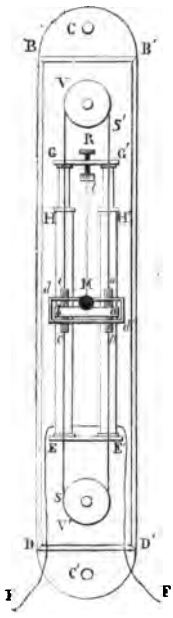


Fig. 403.

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1856, t. XXXII, p. 89.

sont à 102 millimètres de distance. Les diamètres des roues V, V', sont aussi de 102 millimètres. Ces hélices sont maintenues en place au moyen de pièces de laiton GG', EE', horizontales, et fixées à la paroi postérieure de la cage de bois.

La barre transversale de laiton GG' est traversée, en son milieu, par la vis de laiton R ; à cette vis sont attachés un certain nombre de fils de soie supportant un système *astatique* de deux aimants horizontaux dont le côté antérieur se projette en *ab*. Au moyen de la vis R, on peut à volonté soulever ou abaisser le système tout entier. Le disque métallique *t* sert à fixer les fils de suspension ; il peut tourner indépendamment de la vis R, et permet de faire disparaître la torsion qu'éprouvent les fils.

La Figure 404 représente une coupe horizontale de l'appareil au niveau de ce système *astatique*, et montre la dis-

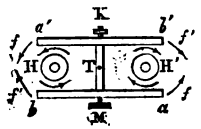


Fig. 404.

position des deux aimants *ab*, *a'b'*, par rapport aux deux hélices HE, H'E', et aux deux cylindres *ic*, *op*. Les deux aimants *ab*, *a'b'*, placés dans un même plan horizontal, l'un en avant et l'autre en arrière des hélices, sont reliés par une traverse de laiton T. Il est facile de voir que les pôles de ces deux aimants de même longueur et de même force sont disposés de manière que le système soit

astatique, ou *indifférent* à l'action de la terre. L'extrémité antérieure de la traverse T porte un miroir M qui fait corps avec le système des deux aimants, et tourne en même temps que lui. A l'aide de ce miroir, d'une lunette et d'une échelle placées à distance, on peut observer les mouvements du système, et déterminer, à chaque instant, la position de son axe horizontal par rapport au plan vertical passant par les axes des deux hélices. Un écrou K, mobile le long d'une vis, sert à contre-balancer le poids du miroir M, et à maintenir les axes des deux aimants dans un même plan horizontal.

Le rectangle *dd* de la Figure 403 est le contour d'un *amortisseur* de cuivre qui, grâce aux courants induits développés pendant les mouvements des barreaux aimantés, amène bientôt le système *astatique* à l'état de repos, et abrége la durée des observations.

Le courant de l'électromoteur est transmis aux hélices au moyen des fils F, F′; un commutateur permet de renverser le sens du courant. Les hélices sont d'ailleurs disposées de manière que le courant les traverse dans des sens opposés. Dès lors, si les cylindres *ic*, *op*, sont susceptibles de se polariser sous l'influence du courant des hélices, les extrémités supérieures des deux cylindres représentent des pôles de *noms contraires;* il en est de même pour leurs extrémités inférieures.

En mettant la roue V en mouvement, on peut (Fig. 405) donner successivement aux cylindres *ic*, *op*, la position 1, la position 2 et la position 3. — Dans la position 2, les pôles des aimants sont en face du milieu de la hauteur des deux cylindres. — Dans la position 1, les pôles *a′*, *b*,

correspondent à l'extrémité inférieure du cylindre *ic*, et les pôles *a*, *b'*, à l'extrémité supérieure du cylindre *op*. — Dans la position 3, les pôles *a'*, *b*, correspondent à l'extrémité supérieure du cylindre *ic*, et les pôles *a*, *b'*, à l'extrémité inférieure du cylindre *op*.

Plaçons le système astatique dans une position telle que le plan horizontal passant par les axes des deux aimants corresponde au milieu de la hauteur des deux hélices HE, H'E', et que chacune de ces hélices soit à égale distance des extrémités correspondantes des barreaux ; puis fermons le courant, et supposons que les cylindres *ic*, *op*, soient de nature à être polarisés. — Si ces cylindres occupent la position 2, les pôles des aimants sont en face des *points neutres* des deux hélices HE, H'E', et des deux cylindres polarisés *ic*, *op* ; par conséquent le système n'est pas influencé et conserve invariablement sa position primitive. — Si les cylindres sont ramenés à la position 1 ou à la position 3, l'action des hélices sur les aimants continue bien à être *nulle*, mais le système astatique, soumis à l'influence des pôles de *noms contraires* des cylindres *ic*, *op*, tourne autour de son point de suspension (1).

1° Employons d'abord un corps *paramagnétique* pour former les cylindres *ic*, *op*, et supposons que le courant

(1) Dans la pratique, les hélices agissent toujours *un peu* sur le système astatique, mais il est possible de disposer une portion du circuit extérieur de manière à annuler cette *action résidue*. Par le fait, le système astatique peut donc toujours être placé dans une position telle qu'il soit complétement mis à l'abri de l'action directrice des hélices, et ne soit influencé que par les cylindres *ic*, *op*.

de chaque hélice marche dans le sens des flèches de la coupe du système astatique (Fig. 405). L'extrémité inférieure *c* du cylindre *ic* et l'extrémité supérieure *o* du

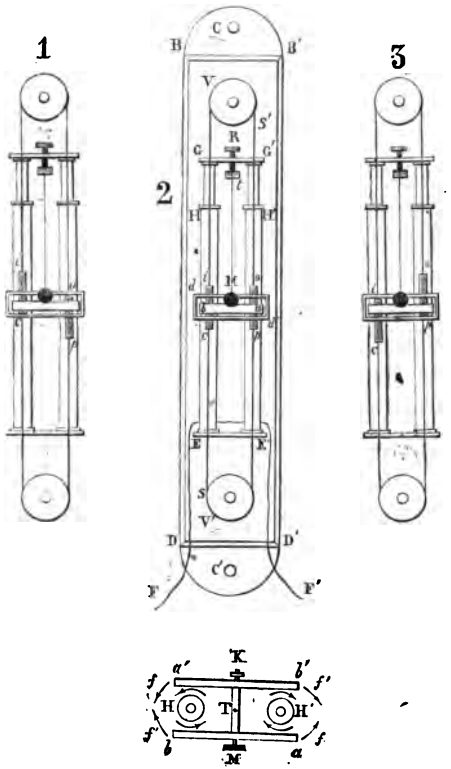


Fig. 405.

cylindre *op* représentent chacune un pôle *boréal*, tandis que l'extrémité supérieure *i* du cylindre *ic* et l'extrémité

inférieure *p* du cylindre *op* représentent chacune un pôle *austral*.

Faisons passer les cylindres de la position 2 à la position 1. Le pôle *boréal c* se place entre *a'* et *b*, et le pôle *boréal o* entre *a* et *b'*; par conséquent *b* et *b'* sont repoussés, tandis que *a* et *a'* sont attirés. L'expérience montre, en effet, que le système *astatique* tourne dans le sens des flèches *f*, *f*.

Faisons passer les cylindres de la position 2 à la position 3. Le pôle *austral i* se place entre *a'* et *b*, et le pôle *austral p* entre *a* et *b'*; par conséquent *a* et *a'* sont repoussés, tandis que *b* et *b'* sont attirés. L'expérience montre, en effet, que le système astatique tourne dans le sens des flèches *f'*, *f'*.

Si l'on renverse le sens du courant dans les hélices, les pôles *magnétiques* changent de place dans chacun des cylindres *ic*, *op*, et les mouvements du système astatique sont inverses de ceux que nous avons décrits, quand les cylindres passent successivement de la position 2 à la position 1, et de la position 2 à la position 3.

2° Employons maintenant une substance *diamagnétique* pour faire les cylindres *ic*, *op*, et supposons que le courant dans chaque hélice marche dans le sens des flèches de la coupe du système astatique (Fig. 405).

Au moment où les cylindres passent de la position 2 à la position 1, le système astatique se meut dans le sens des flèches *f'*, *f'*; par conséquent l'extrémité inférieure *c* du cylindre *ic* et l'extrémité supérieure *o* du cylindre *op* représentent chacune un pôle *austral*.

Au moment où les cylindres passent de la position 2 à

la position 3, le système astatique se meut dans le sens des flèches *f*, *f*; par conséquent l'extrémité supérieure *i* du cylindre *ic* et l'extrémité inférieure *p* du cylindre *op* représentent chacune un pôle *boréal*.

D'ailleurs, quand on renverse le sens du courant des hélices, les mouvements du système astatique sont inverses de ceux que nous avons décrits.

Il résulte évidemment de ces expériences que :

Sous l'influence d'un courant voltaïque inducteur, les substances *diamagnétiques* se *polarisent* comme les substances *paramagnétiques;* mais les *pôles* développés dans les corps *diamagnétiques* ont une position *inverse* de celle qu'ils prennent dans les corps *paramagnétiques* placés dans les mêmes circonstances.

Les substances étudiées par M. Tyndall sont les suivantes :

Corps paramagnétiques.		Corps diamagnétiques.	
Solides	Ardoise de Penrhyn.	Solides	Bismuth.
	Ardoise de Caermarthen.		Antimoine.
	Ardoise perpendiculaire au plan de clivage.		Verre pesant.
	Chlorure de fer.		Spath calcaire.
	Sulfate de fer.		Marbre de statuaire.
	Carbonate de fer.		Phosphore.
	Prussiate rouge de potasse.		Soufre.
	Oxyde de fer.		Nitre.
	Limaille de fer.		Cire.
Liquides (1).	Sulfate de fer.	Liquides.	Eau distillée.
	Chlorure de nickel.		Sulfure de carbone.
	— de cobalt.		

(1) Les liquides étaient placés dans des cylindres de verre.

M. Tyndall a aussi opéré avec de la *poudre de bismuth* enfermée dans des cylindres de verre.

Dans les expériences de M. Tyndall, l'action des cylindres *diamagnétiques* sur le système astatique n'est pas une *action instantanée*, sensible seulement au moment où ces cylindres changent de position dans les hélices. Dans chaque essai, le système astatique prend une position d'équilibre, et la *conserve* tant que les cylindres eux-mêmes sont maintenus *immobiles* dans les positions 1 et 3. L'action de ces cylindres est donc *permanente ;* elle est due à une cause *durable*, et ne saurait être rapportée au développement de courants *induits instantanés*.

D'ailleurs, les effets produits par les corps *diamagnétiques isolants* et par la *poudre* de bismuth ne permettent pas de recourir au développement de courants *induits* pour expliquer les mouvements communiqués au système astatique.

Ainsi donc en résumé :

1° Tout corps, conducteur ou isolant, solide, liquide ou gazeux, se *polarise* quand il est soumis à l'influence d'un *centre magnétique*.

2° Pour certaines substances, le *centre magnétique* et l'*extrémité la plus rapprochée* du *corps influencé* représentent des *pôles de noms contraires* et *s'attirent :* tels sont le *fer doux* et tous les corps *paramagnétiques*.

3° Pour d'autres substances, le *centre magnétique* et l'*extrémité la plus rapprochée* du *corps influencé* représentent des pôles de *même nom* et *se repoussent :* tels sont le *bismuth* et tous les corps *diamagnétiques*.

ARTICLE II.

ACTION DU MAGNÉTISME SUR LA LUMIÈRE POLARISÉE.

En 1845, M. Faraday (1) démontra que les barreaux aimantés, les électro-aimants et les hélices électro-dynamiques jouissent de la propriété d'agir sur un faisceau de lumière polarisée soumise à leur influence, d'imprimer un mouvement de déviation à son plan de polarisation. Depuis cette époque, des recherches nombreuses ont été faites dans cette direction ; les principaux travaux publiés sur cette question sont les Mémoires de MM. Pouillet (2), Ed. Becquerel (3), Malthiessen (4), Bertin (5), Matteucci (6), Wertheim (7), Wiedemann (8), et Verdet (9).

Les expériences relatives à l'influence du magnétisme sur la lumière peuvent facilement être exécutées avec le grand électro-aimant de M. Ruhmkorff modifié ainsi qu'il suit (Fig. 406). — Le barreau de fer doux de chacune

(1) *Experimental Researches*, t. III, p. 1 et 453. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1846, t. XVII, p. 359. — *Biblioth. univ. de Genève*, 1846, t. I, p. 385; t. II, p. 19 et 42; t. III, p. 338.

(2) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1846, t. XXII, p. 135.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1846, t. XVII, p. 437.

(4) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1847, t. XXIV, p. 969; t. XXV, p. 20 et 173.

(5) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1848, t. XXIII, p. 5.

(6) *Ibid.*, 3e série, 1848, t. XXIV, p. 354; — 1850, t. XXVIII, p. 495.

(7) *Ibid.*, 3e série, 1854, t. XL, p. 156.

(8) *Ibid.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 121.

(9) *Ibid.*, 3e série, 1854, t. XLI, p. 370; — 1855, t. XLIII, p. 37; — 1858, t. LII, p. 129.

des bobines est creusé d'un canal cylindrique dans toute sa longueur, et muni d'une pièce polaire percée aussi. A l'extrémité du canal du barreau de la bobine S′, on place un prisme de Nicol P′ destiné à polariser la lumière. L'extrémité du canal de la bobine S porte un analyseur composé

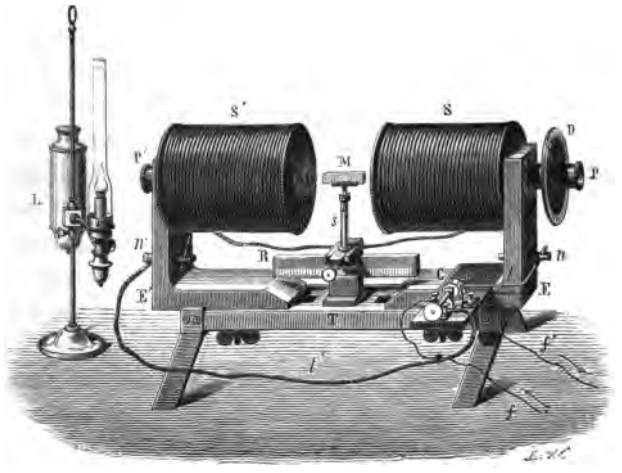


Fig. 406.

d'un limbe circulaire D, fixe et gradué, d'une alidade et d'un second prisme de Nicol P qui tourne avec l'alidade. Le support *s* sert à maintenir la substance transparente M dans le champ magnétique, et sur le trajet du faisceau polarisé. Une lampe L, placée en face du prisme P′, fournit la lumière. Le commutateur C sert à fermer et à ouvrir le circuit des bobines; il permet aussi de changer le sens du courant voltaïque, et, par suite, de renverser la position des pôles de l'électro-aimant.

Quand le corps transparent à essayer est solide, après l'avoir taillé en forme de parallélipipède, on le place sur le support *s* dans une position telle que ses faces extrêmes soient perpendiculaires à la direction du faisceau lumineux, et, par conséquent, à la ligne des pôles. — Pour opérer sur des liquides, on les verse dans de petites cuves de verre mince, placées sur le support *s* de manière que leurs faces extrêmes soient aussi perpendiculaires à la ligne des pôles.

Avant de *fermer* le circuit des bobines, plaçons un parallélipipède de *verre pesant* (silico-borate de plomb) sur le support *s*. Le faisceau de lumière se polarise en traversant le prisme P', passe dans la substance transparente M, s'engage dans le canal du barreau de la bobine S, et arrive au second prisme P. Faisons tourner l'alidade et le second prisme P, jusqu'à ce que le faisceau polarisé transmis soit *éteint*. — Toutes les pièces de l'appareil conservant leur position, *fermons* le circuit des bobines ; le faisceau lumineux *reparaît* immédiatement. Si nous *interrompons* le circuit, le faisceau polarisé s'*éteint* de nouveau, pour *reparaître* encore lorsque le circuit est de nouveau *fermé*.

Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse, dans la direction de la *ligne axiale*, un parallélipipède de *verre pesant* soumis à l'action des pôles d'un électro-aimant, il éprouve donc une modification analogue à celle que lui imprime son passage à travers une lame de quartz perpendiculaire à l'axe; son plan de polarisation est dévié.

Le circuit des bobines étant *ouvert*, donnons au prisme analyseur P une position telle que le faisceau polarisé soit

éteint, et notons la division du limbe D correspondante au repère de l'alidade. — *Fermons* le circuit des bobines, le faisceau polarisé *reparaît*. Tournons alors l'analyseur P, jusqu'à ce que le faisceau transmis soit de nouveau *éteint*, et notons la division du limbe D correspondante à cette seconde position de l'alidade. — Le *sens* et l'*étendue* du déplacement angulaire imprimé à l'alidade, pour faire passer le prisme P de la première à la deuxième position, déterminent le *sens* et l'*amplitude* de la déviation du plan de polarisation du faisceau lumineux (1).

Le *sens* de la déviation du plan de polarisation du faisceau lumineux, transmis dans la direction de la ligne *axiale*, dépend à la fois du *sens* du courant voltaïque de l'électro-aimant, et de la *nature* de la substance transparente placée, dans le champ magnétique, sur le trajet du faisceau. Les derniers travaux de M. Verdet établissent une distinction importante entre les substances transparentes qui ne contiennent pas de métal paramagnétique ou *attiré* par les aimants, et celles qui contiennent un métal paramagnétique. — Quand le plan de polarisation est dévié dans le sens du courant des bobines, nous

(1) Quand on veut mesurer très exactement la déviation du plan de polarisation, on remplace le prisme de Nicol P par un prisme biréfringent de spath d'Islande achromatisé pour le rayon extraordinaire. On place cet analyseur dans une position telle que, le circuit des bobines étant *ouvert*, l'image extraordinaire soit *éteinte*. On *ferme* ensuite le circuit voltaïque, l'image extraordinaire *reparaît colorée ;* alors, on tourne l'analyseur jusqu'à ce que l'image extraordinaire prenne la teinte *sensible* gris de lin. L'angle décrit par l'alidade, dans le passage de la première à la seconde position de l'analyseur, mesure la déviation du plan de polarisation.

dirons, avec ce physicien, que la substance transparente acquiert un *pouvoir rotatoire magnétique positif;* quand, au contraire, le plan de polarisation est dévié en sens inverse du courant des bobines, nous dirons que la substance transparente acquiert un *pouvoir rotatoire magnétique négatif.*

A. — **Substances transparentes qui ne contiennent pas de métal paramagnétique.** — Dans ce cas, la déviation du plan de polarisation s'opère toujours dans le sens du courant voltaïque des bobines ; le *pouvoir rotatoire magnétique* acquis par la substance transparente est toujours *positif.* L'exactitude de cette proposition peut facilement être démontrée.

En effet, plaçons en M (Fig. 406), dans le champ magnétique, un parallélipipède de *verre pesant*, et supposons le courant dirigé de manière que l'extrémité libre de la bobine S' soit le pôle *austral* de l'électro-aimant. Pour l'observateur placé en P, le courant marche de *droite à gauche* dans la partie supérieure des bobines ; dans ce cas, le plan de polarisation du faisceau lumineux est dévié à *gauche.*

A l'aide du commutateur C, renversons le courant; l'extrémité libre de la bobine S' devient le pôle *boréal* de l'électro-aimant. Pour l'observateur placé en P, le courant marche de *gauche à droite* dans la partie supérieure des bobines; dans ce cas, la rotation du plan de polarisation du faisceau lumineux change aussi de côté, la déviation de ce plan se fait à *droite.*

Le *pouvoir rotatoire magnétique* acquis par le *verre pesant* est donc *positif.* Le plan de polarisation du faisceau

lumineux transmis est dévié dans le sens du courant voltaïque des bobines, ou encore dans le sens des courants moléculaires qui, dans la théorie d'Ampère, s'établiraient dans un barreau de fer doux mis en place du corps diaphane, et soumis à l'action de l'électro-aimant.

M. Faraday a remplacé l'électro-aimant tantôt par un aimant permanent en fer à cheval, tantôt par une simple hélice électro-dynamique; au lieu de placer le verre pesant entre deux pôles de noms contraires, il l'a soumis à l'influence d'un seul pôle magnétique *austral* ou *boréal*. Dans toutes ces circonstances, la nature des effets produits est restée la même. Le *verre pesant* traversé par un faisceau lumineux dans la direction de la *ligne axiale* acquiert constamment un *pouvoir rotatoire magnétique positif;* la seule différence observée consiste dans l'*amplitude* de l'angle de déviation du plan de polarisation.

Parmi les substances transparentes qui, à l'état naturel, n'exercent aucune influence sur la lumière polarisée, beaucoup de corps solides et de corps liquides, soit anhydres, soit à l'état de dissolution aqueuse, acquièrent, comme le *verre pesant*, mais à des *degrés divers*, la propriété de dévier le plan de polarisation tant qu'ils restent soumis à l'action des pôles magnétiques. Du reste, quel que soit le corps diaphane placé dans le champ magnétique, le *pouvoir magnétique rotatoire* acquis est toujours *positif*, si la substance ne contient pas de métal paramagnétique.

Les faits observés jusqu'à présent tendent à établir que les électro-aimants les plus puissants ne peuvent commu-

niquer aucune trace appréciable de *pouvoir rotatoire* ni à l'air, ni aux autres gaz.

Parmi les substances solides et liquides qui, à l'état naturel, dévient le plan de polarisation, quelques-unes sont susceptibles d'acquérir le *pouvoir rotatoire magnétique*. Dans ce cas, l'action du magnétisme conserve toujours le même caractère. On peut donc, en faisant varier la position des pôles de l'électro-aimant, disposer l'expérience de manière que le *pouvoir rotatoire magnétique* et le *pouvoir rotatoire naturel* de la substance diaphane sollicitent le plan de polarisation du faisceau transmis dans le même sens, ou en sens contraires. Dans le premier cas, l'effet *total* est égal à la somme des deux effets *partiels*, et dans le second à leur différence.

En résumé, quand une substance diaphane qui ne contient pas de métal paramagnétique est apte à communiquer l'influence du magnétisme à la lumière polarisée, le phénomène est indépendant de la *nature* du corps en expérience ; le *pouvoir rotatoire magnétique* acquis est toujours *positif*. En d'autres termes, le plan de polarisation est toujours dévié dans le sens du courant des bobines, ou des courants qui, dans la théorie d'Ampère, s'établiraient dans un barreau de fer doux mis en place du corps transparent dans le champ magnétique.

B. — **Substances transparentes qui contiennent un métal paramagnétique**. — Les dernières recherches de M. Verdet portent à *dix* le nombre des métaux incontestablement paramagnétiques, ou *attirés* par les pôles d'un aimant. Ce sont : le fer, le nickel, le cobalt, le manganèse, le chrome, le titane, le cérium, l'uranium, le lanthane et le mo-

lybdène. — Le platine et ses analogues paraissent paramagnétiques; cependant, comme tous leurs composés sont diamagnétiques, M. Verdet pense que le genre d'influence du magnétisme sur ces métaux n'est pas encore assez nettement déterminé.

M. Verdet a établi que, par les propriétés qu'ils communiquent à leurs composés transparents, les métaux paramagnétiques se divisent en deux classes : la première comprend le fer, le chrome, le titane, le cérium, l'uranium et le lanthane; la seconde comprend le nickel, le cobalt, le molybdène et le manganèse.

Première classe. — Les sels des métaux de la première classe, étudiés en dissolution dans l'eau, l'alcool, l'éther et l'esprit de bois, prennent, sous l'influence des pôles d'un électro-aimant, un pouvoir rotatoire magnétique *négatif*. Ces dissolutions impriment au plan de polarisation du faisceau lumineux une déviation dont le sens est *contraire* à celui du courant des bobines — Le fer est le type des métaux de cette classe. Le pouvoir rotatoire magnétique *négatif* des sels de peroxyde de fer est beaucoup plus considérable que celui des sels de protoxyde. Contrairement à ce qui existe pour tous les autres composés de ce métal, le cyanure *jaune* de potassium et de fer est *diamagnétique*, et prend un pouvoir rotatoire magnétique *positif très faible*. — L'acide chromique et les chromates acquièrent un pouvoir rotatoire magnétique *négatif;* le chromate *neutre* de potasse, quoique *diamagnétique*, prend un pouvoir rotatoire *négatif assez faible*. Le cyanure double de potassium et de chrome prend un pouvoir rotatoire *positif*. — Le bichlorure de titane, composé

liquide à la température ordinaire, prend un pouvoir rotatoire magnétique *négatif*, un peu supérieur en valeur absolue au pouvoir rotatoire *positif* de l'eau. — Le chlorure de cérium en dissolution concentrée permet de constater bien nettement le pouvoir rotatoire magnétique *négatif* de ce sel. — Le nitrate d'urane est diamagnétique, mais son pouvoir rotatoire est *négatif*. — Le chlorure de lanthane acquiert aussi un pouvoir rotatoire magnétique *négatif*.

Deuxième classe. — Les sels des métaux de cette deuxième classe prennent, sous l'influence des pôles d'un électro-aimant, un pouvoir rotatoire magnétique *positif*. Leurs dissolutions dévient le plan de polarisation du faisceau lumineux dans le sens du courant des bobines. — Le nikcel est le type des métaux de cette deuxième classe; tous ses sels prennent un pouvoir rotatoire magnétique *positif assez marqué*. — Le pouvoir rotatoire *positif* des sels de cobalt est *moins marqué* que celui des sels de nikcel. Ce métal forme avec le potassium un cyanure double diamagnétique, dont le pouvoir rotatoire est *positif*. — Les molybdates de soude et d'ammoniaque sont diamagnétiques; leur pouvoir rotatoire magnétique est *positif*, mais assez *faible*. — Les sels de protoxyde de manganèse prennent tous un pouvoir rotatoire magnétique *positif*. Cependant M. Verdet s'est assuré que le cyanure double de potassium et de manganèse, correspondant par sa composition au cyanure rouge de fer et de potassium, prend un pouvoir rotatoire magnétique *négatif*. A ce sujet, ce physicien fait observer que le manganèse représente en quelque sorte la liaison entre

les deux classes qu'il a établies parmi les métaux paramagnétiques; ce qui est la règle pour les composés de fer est l'exception pour les composés de manganèse, et *vice versâ*.

Lois de l'action du magnétisme sur la lumière. — Pour déterminer la loi élémentaire des phénomènes, M. Verdet a remplacé les armures coniques de l'appareil de Ruhmkorff par deux cylindres de fer doux F, F′, de *cinq* centimètres d'épaisseur sur *quatorze* centimètres de diamètre (Fig. 407). Par des expériences directes, il s'est assuré que la grandeur de la déviation, pour un paralléli-

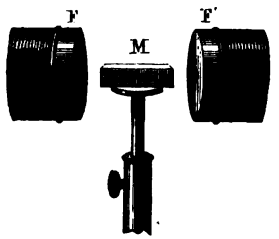


Fig. 407.

pipède M de même épaisseur, restait la même, quelque position que le corps transparent occupât dans l'espace compris entre les faces planes des deux cylindres F, F′, pourvu qu'il ne fût pas trop rapproché des limites de cet espace; par conséquent, l'effet produit sur la lumière polarisée était le *même* dans chacun des éléments du corps diaphane.

M. Verdet s'est assuré, en outre, que cet espace était ce que M. Faraday appelle *un champ magnétique d'égale intensité;* il a constaté, en effet, que la résultante des actions de l'électro-aimant sur une molécule de fluide

magnétique située en un point quelconque de cet espace était sensiblement *constante* en grandeur et en direction, tant que la molécule n'était pas très voisine des limites de cet espace (1).

Dans toutes ses expériences, M. Verdet a déterminé : 1° la grandeur de l'action magnétique pour un point de l'espace compris entre les armures F, F′; 2° la déviation du plan de polarisation produite par le corps diaphane placé dans le même point du champ magnétique.

De ses recherches M. Verdet a déduit cette loi très simple :

« Il y a proportionnalité entre l'action magnétique et » la rotation du plan de polarisation. »

Déjà M. Faraday, dans son premier Mémoire, avait dit:

« Le pouvoir de détourner le rayon lumineux, dans les » limites de force que j'ai employées, paraît être directement » proportionnel à l'intensité de la force magnétique. »

En 1851, M. Wiedemann avait mesuré la rotation du plan de polarisation produite par des liquides renfermés dans une hélice électro-dynamique; il résulte de ses recherches que, dans ces conditions, la rotation est proportionnelle à l'intensité du courant.

Après avoir prouvé que la proportionnalité de la rotation et de l'action magnétique se vérifie avec la même exactitude, soit que la distance des centres magnétiques à la substance transparente vienne à changer, soit que la

(1) M. Verdet a exposé avec beaucoup de soin (*Ann. de chim. et de phys.*, 1854, t. XLI, p. 385) le procédé expérimental très délicat et très rigoureux qu'il a employé pour la détermination de cette résultante des actions magnétiques.

quantité de fluide magnétique libre accumulée en ces divers centres éprouve une variation, M. Verdet ajoute :

« Cette loi de proportionnalité est démontrée par nos » expériences pour des corps transparents de dimensions » finies dont toutes les portions sont également affectées » par l'électro-aimant; elle est donc vraie pour toutes les » tranches infiniment petites dans lesquelles on peut con- » cevoir le corps transparent décomposé. Il résulte de là » que la loi élémentaire des phénomènes peut se formuler » de la manière suivante :

» Le pouvoir rotatoire développé par l'action d'un » centre magnétique dans une tranche infiniment mince » d'une substance monoréfringente varie proportion- » nellement à l'action magnétique, c'est-à-dire en raison » directe de la quantité de magnétisme accumulée en ce » centre, et en raison inverse du carré de la distance. »

Cette loi nous conduit à la conséquence suivante : Pour une substance diaphane quelconque maintenue dans un champ magnétique d'égale intensité, la déviation du plan de polarisation doit être proportionnelle à l'épaisseur du corps essayé. Cette relation avait été indiquée par M. Faraday lui-même dans son premier Mémoire. A la fin de son travail, M. Verdet cite des résultats obtenus en opérant sur du verre pesant et du sulfure de carbone, qui d'une part démontrent qu'il y a proportionnalité entre la déviation et l'épaisseur de la substance diaphane, et d'autre part vérifient l'exactitude de la loi élémentaire des phénomènes telle qu'il l'a découverte et établie.

Comme M. Faraday lui-même et comme tous les observateurs qui se sont occupés du même sujet, M. Verdet a

reconnu que le magnétisme de l'électro-aimant met un certain temps à se développer et atteindre son *maximum*. Il résulte de là qu'au moment où l'on ferme le circuit, l'intensité de l'image qui accuse la déviation du plan de polarisation n'acquiert pas tout à coup son *maximum*, et augmente graduellement pendant un certain temps.

Dans son premier travail sur la rotation du plan de polarisation de la lumière sous l'influence du magnétisme, M. Faraday avait annoncé que la déviation atteint son *maximum* quand le faisceau lumineux marche parallèlement à la ligne des pôles, et que l'effet est *nul* quand la direction du faisceau est perpendiculaire à cette ligne. L'exactitude de ces faits a été vérifiée depuis par tous les physiciens qui se sont occupés du même sujet; mais personne n'avait cherché à déterminer la loi du décroissement de la déviation du plan de polarisation. M. Verdet s'est occupé de cette question, et a déterminé la loi très simple du phénomène.

Après avoir vérifié que, quelle que soit l'inclinaison de la ligne des pôles par rapport à la direction du faisceau lumineux polarisé, l'action magnétique ne produit jamais qu'une simple déviation du plan de polarisation, il a prouvé, par des expériences nombreuses et conduites avec une grande habileté, que :

« La rotation du plan de polarisation est proportion-
» nelle au cosinus de l'angle compris entre la direction du
» rayon lumineux et celle de l'action magnétique. »

Enfin, M. Verdet s'est assuré, par des expériences directes, que la rotation *négative* produite par les composés de quelques métaux paramagnétiques varie suivant les

mêmes lois que la rotation *positive* produite par la généralité des substances transparentes.

La nature du corps transparent à travers lequel la lumière est transmise exerce aussi une grande influence sur la grandeur de la déviation du plan de polarisation déterminée par le magnétisme. Les différences, très considérables pour les corps solides, sont beaucoup moins prononcées pour les substances liquides. M. Faraday pensait même que, dans les dissolutions aqueuses, l'effet devait être rapporté tout entier à l'eau. Cette question de l'influence du corps dissous sur l'amplitude de la déviation du plan de polarisation a été reprise par M. Verdet. Il résulte de ses recherches que :

« Lorsqu'un sel se dissout dans l'eau, l'eau et le sel » apportent chacun dans la dissolution leur pouvoir rota- » toire magnétique spécial, et la rotation produite par la » dissolution est la *somme* des rotations individuelles dues » aux molécules de l'une et l'autre substance. »

Le tableau suivant donne, d'après les recherches de M. Bertin, les rapports des déviations qu'éprouve le plan de polarisation de la lumière, quand le faisceau traverse diverses substances diaphanes, ramenées à la même épaisseur et soumises à une action magnétique de même intensité.

Flint Faraday	1,00	Protochlorure de phosphore.....	0,51
— Guinant.....	0,87	Chlorure de zinc dissous.	0,55
— Mathiessen	0,83	Chlorure de calcium dissous.....	0,43
— très dense (du Conservatoire).....	0,55	Eau.....	0,23
— commun.....	0,53	Alcool ordinaire à 36°...	0,18
Bichlorure d'étain... ..	0,77	Éther.	0,15
Sulfure de carbone	0,74		

Les expériences de M. Bertin avaient porté quelques physiciens à admettre que l'action exercée sur le plan de polarisation de la lumière, par une substance placée entre les pôles d'un électro-aimant, est, en général, d'autant plus forte que son indice de réfraction est plus élevé. Les résultats des recherches de M. Verdet, consignés dans le tableau suivant, montrent que cette règle n'est pas admissible.

	Indice de réfraction moyen.	Rotation complète (1) produite par une épaisseur de 44 millim.
Eau distillée	1,334	4°,00
Dissolution de sel ammoniac (étendue)	1,359	4°,45
— de protochlorure d'étain (étendue)	1,364	5°,27
— de sel ammoniac (concentrée)	1,370	5°,29
— de carbonate de potasse	1,371	4°,21
— de chlorure de calcium	1,372	4°,55
— de perchlorure d'étain (étendue)	1,378	6°,10
— de chlorure de zinc	1,394	5°,57
— de protochlorure d'étain (concentrée)	1,424	8°,16
— de nitrate d'ammoniaque	1,448	3°,44
Chlorure de carbone liquide (C^2Cl^4)	1,466	5°,12

Nature du phénomène. — Les physiciens ne sont pas d'accord sur l'explication du phénomène de la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière. — MM. Becquerel pensent (2) que cet effet est dû à un changement moléculaire survenu dans l'état du corps diaphane soumis à l'influence de l'aimant. — M. Pouillet

(1) M. Verdet appelle *rotation complète*, la différence des deux azimuts de la teinte de passage correspondant à deux directions opposées du courant.

(2) *Traité d'électricité et de magnétisme*. Paris, 1856, t. III, p. 89.

suppose (1) « que l'électro-aimant détermine, dans l'éther » du corps diaphane, un mouvement de rotation dont » la vitesse n'est pas insensible par rapport à celle de la » lumière, et qui s'accomplit dans le sens même que l'on » a hypothétiquement admis pour être celui des courants » constitutifs des aimants. »—M. De la Rive admet (2) « que » l'action de l'aimant ne s'exerce ni sur les particules du » corps diaphane seulement, ni sur l'éther seul, mais » sur la manière d'être des particules avec l'éther. »

On doit à M. Faraday (3) une expérience d'une haute importance. Soit M (Fig. 408), un morceau de verre pesant. Recouvrons ses faces opposées a, b, d'une lame

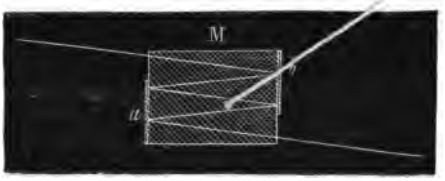


Fig. 408.

d'argent poli, de manière à laisser à nu une très petite portion de chacune d'elles; puis plaçons ce morceau de verre entre les pôles d'un aimant dans une position telle que ses faces a, b, soient légèrement inclinées sur le trajet du faisceau de lumière polarisée. Le faisceau entre par la face a, subit plusieurs réflexions dans l'intérieur du verre, et vient sortir par la face opposée b.

(1) *Éléments de physique expérimentale.* Paris, 1856, 7e édition, t. II, p. 495.

(2) *Traité d'électricité.* Paris, 1854, t. I, p. 557.

(3) *Experimental Researches*, t. III, p. 453.

Lorsque le rayon sort après deux réflexions, il a traversé trois fois le bloc de verre, deux fois de *a* en *b*, une fois de *b* en *a*; lorsqu'il éprouve *quatre* réflexions intérieures, il a traversé *cinq* fois le bloc de verre au moment de son émergence, *trois* fois de *a* en *b* et *deux* fois de *b* en *a*. D'après les mesures de M. Faraday, après *deux* réflexions intérieures, c'est-à-dire après *trois* trajets, la déviation du plan de polarisation est *trois* fois plus considérable, et après *quatre* réflexions intérieures, c'est-à-dire après *cinq* trajets, la déviation du plan de polarisation est cinq fois plus considérable qu'après *un seul* trajet direct. Ainsi donc :

1° Quand la nature de la substance diaphane soumise à l'action de l'aimant et l'intensité du courant des bobines restent les mêmes, la grandeur de l'angle de déviation dépend de la longueur du trajet parcouru par la lumière dans l'intérieur de la substance diaphane.

2° Le sens de la déviation dépend *uniquement* du sens du courant des bobines, et est complétement indépendant du sens dans lequel la substance diaphane est traversée par la lumière.

Ce fait, établi par M. Faraday, que la déviation éprouvée dans le trajet *direct* de *a* en *b* s'ajoute à la déviation éprouvée pendant le trajet de *retour* de *b* en *a*, ne permet pas de considérer le phénomène comme l'effet d'un changement moléculaire survenu dans l'état du corps diaphane. Quelle que fût, en effet, cette modification, les déviations éprouvées pendant le trajet *direct* et pendant le trajet de *retour* seraient évidemment *égales* et de *sens opposés*, et, contrairement aux résultats de l'expérience,

quand le faisceau lumineux émergerait par la face *b* après un nombre quelconque de réflexions intérieures, la déviation de son plan de polarisation serait exactement la *même* qu'après *un seul* trajet *direct*.

Il nous semble que, dès 1845, M. Faraday avait parfaitement caractérisé le phénomène de la rotation magnétique du plan de polarisation, dans le passage suivant de son premier Mémoire (1) :

« Les forces magnétiques n'agissent pas sur le rayon » directement et sans l'intervention de la matière, mais » bien par l'intermédiaire de la substance dans laquelle » ces forces et le rayon existent simultanément ; les sub- » stances et les forces donnant les unes aux autres et rece- » vant les unes des autres le pouvoir d'agir sur la lumière. » Cela se prouve par l'absence d'effet dans le vide, l'air, » ou les gaz; et cela se prouve subsidiairement par l'in- » fluence de la nature des substances sur l'intensité de » leur pouvoir rotatoire magnétique. Ce qui fait voir que » la force magnétique et la lumière sont en rapport direct, » c'est que la première agit toujours sur le faisceau lumi- » neux de la même manière et dans le même sens, indé- » pendamment de la nature (2) de la substance, de son état » solide ou liquide, et de sa force rotatoire propre ; mais » la nécessité de la présence des corps pondérables et les » différences qui existent dans l'intensité de leurs pouvoirs

(1) *Experimental Researches*, t. III, p. 20.

(2) Les recherches de M. Verdet sur les propriétés des composés de quelques métaux paramagnétiques ne permettent plus d'admettre cette complète indépendance de la nature de la substance diaphane et du sens de la déviation du plan de polarisation.

» prouvent que le magnétisme et la lumière agissent l'un » sur l'autre par l'intermédiaire de la matière. »

CHAPITRE VII.

EFFETS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Avant d'aborder l'histoire des phénomènes mécaniques, calorifiques et lumineux produits par l'électricité, il nous paraît convenable de dire quelques mots des principaux résultats des travaux entrepris dans le but de déterminer la vitesse de propagation de cet agent.

Vitesse de propagation de l'électricité. — Nous avons déjà parlé (tome I, p. 166) des recherches de M. Wheatstone sur la vitesse de propagation des décharges d'électricité statique. Dans ces dernières années, les physiciens ont profité de l'établissement des grandes lignes télégraphiques, pour entreprendre des études de même genre sur les courants voltaïques. Parmi ces travaux, celui de MM. Fizeau et Gounelle (1) se distingue par l'importance des résultats, et par l'exactitude de la méthode expérimentale. Ils ont opéré sur les fils des télégraphes électriques de Paris à Rouen, et de Paris à Amiens. Les deux fils de chacune de ces lignes pouvaient être réunis à Rouen et à Amiens, et venaient aboutir par leurs extrémités

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1850, t. XXX, p. 437; — 1854, t. XXXIX, p. 469.

libres dans une même salle du ministère de l'intérieur. La ligne d'Amiens présentait ainsi un circuit fermé à Amiens, ouvert à Paris, et dont la longueur, double de la distance de ces deux villes, était de 314 kilomètres. La ligne de Rouen fournissait un circuit semblablement disposé, et de 288 kilomètres de longueur. La communication de Paris à Amiens est tout entière en *fil de fer;* celle de Paris à Rouen est pour *un tiers en fil de fer*, et pour les *deux autres tiers en fil de cuivre.* « Le principe de la nouvelle » méthode expérimentale consiste à interrompre un cou- » rant, à des intervalles de temps très rapprochés et » *simultanément*, dans deux points très éloignés d'un con- » ducteur, et à observer sur un galvanomètre les dévia- » tions produites, lesquelles varient avec le nombre des » interruptions, et deviennent *maximum* pour un certain » nombre d'interruptions et *minimum* pour un autre. »

Supposons qu'on veuille agir sur la ligne d'Amiens. Après avoir réuni, à Amiens, les extrémités des deux fils télégraphiques F, F′ (Fig. 409), faisons communiquer, à Paris, l'extrémité libre du fil F avec le ressort métallique A′, et l'extrémité libre du fil F′ avec le ressort métallique C′. — Une pile P communique par son pôle positif avec le ressort métallique A, et par son pôle négatif avec la terre; enfin, des deux extrémités du fil du galvanomètre G, l'une est attachée au ressort métallique C, et l'autre plonge en terre. Les deux ressorts A, A′, sont isolés l'un de l'autre, il en est de même des deux ressorts C, C′. — R est une roue de bois, dont la tranche présente 36 divisions égales, 18 de platine et 18 de bois alternant entre elles. — Chaque paire de ressorts (A, A′), (C, C′)

forme un interrupteur distinct, la première (A, A′) au point de départ, et la seconde (C, C′) au point d'arrivée du courant. Ces deux interrupteurs sont réglés de manière que leurs effets concordent exactement, c'est-à-

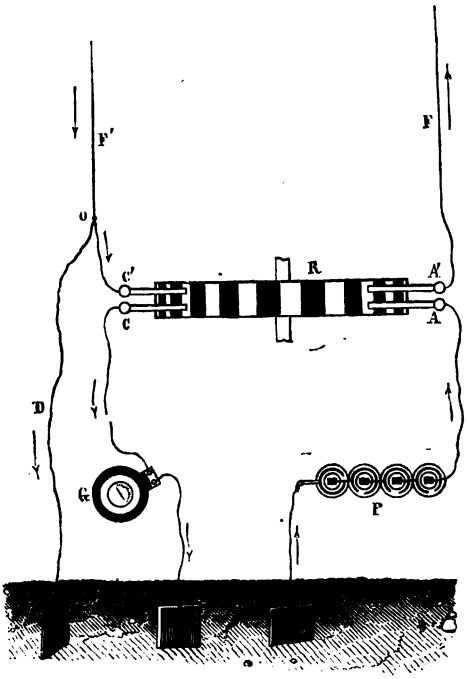


Fig. 409.

dire de manière que les deux paires de lames (A, A′), (C, C′) passent *simultanément* d'une lame conductrice à un intervalle isolant, et réciproquement.

Quand la roue R est au repos, le circuit de la ligne et

du galvanomètre est à la fois ouvert ou fermé en (A, A') et en (C, C'), suivant que les ressorts reposent sur un intervalle isolant de bois ou sur un intervalle conducteur de platine; mais, quand la roue R est en mouvement, ce même circuit est alternativement ouvert et fermé en (A, A'), et éprouve des alternatives semblables et *simultanées* en (C, C'). Il en résulte qu'il n'y a de courant envoyé sur la ligne que pendant la durée du contact des quatre ressorts A, A', C, C', avec les lames métalliques de la roue.

Faisons tourner la roue sur son axe, la pile P envoie sur la ligne, à travers l'interrupteur (A, A') et le fil F, une série de courants interrompus qui reviennent par le fil F', et ne peuvent pénétrer dans le galvanomètre G qu'après avoir traversé l'interrupteur (C, C'). Il ne passe donc dans le galvanomètre que des courants discontinus. Mais M. Pouillet a démontré expérimentalement (page 147) que, lorsque les interruptions se succèdent rapidement, l'aiguille est déviée d'une manière stable, comme si le courant était continu.

Si la vitesse de l'électricité était infinie; si, du ressort A' au ressort C', la transmission s'opérait instantanément à travers la ligne, tout se passerait évidemment comme s'il n'y avait qu'un interrupteur. Le courant arriverait au galvanomètre G au moment où l'interrupteur (A, A') toucherait une lame métallique de la roue; son action sur l'aiguille aimantée durerait autant que le contact, et finirait au moment où l'interrupteur (A, A') passerait d'une lame conductrice à un espace isolant.

Mais, si l'électricité emploie un temps *fini* pour se rendre de A' en C' à travers la ligne, les choses ne

se passent pas ainsi. D'une part, bien que les interrupteurs soient parfaitement concordants, l'écoulement du courant à travers (C, C') et le galvanomètre G commence seulement quelque temps après son émission à travers l'interrupteur fermé (A, A'); d'autre part, en raison même de la concordance des interrupteurs, le circuit est rompu en (C, C') avant que la totalité de l'électricité émise à travers l'interrupteur (A, A') pendant la durée du passage simultané des *quatre* ressorts sur les lames conductrices, ait eu le temps de s'écouler à travers le galvanomètre G. Il en résulte nécessairement qu'au moment de la rupture du circuit à ses deux extrémités, les fils F, F', sont encore chargés d'une certaine quantité d'électricité, qui reste sur ces fils tant que dure cette double rupture du circuit ou le passage simultané des quatre ressorts sur les intervalles isolants de la roue, et ne peu s'écouler à travers le galvanomètre G qu'au moment où le circuit est de nouveau fermé par ses deux extrémités à la fois.

Pour se mettre à l'abri des effets perturbateurs de cette condensation d'électricité sur le fil de la ligne, MM. Fizeau et Gounelle établissent, en O, une communication *directe* du fil F' avec la terre, au moyen du conducteur D. Il en résulte que, par son extrémité O, le circuit est toujours fermé : au moyen du conducteur D seulement quand l'interrupteur (C, C') est sur un espace isolant, à la fois par le conducteur D et le galvanomètre G quand l'interrupteur (C, C') est sur une lame conductrice. — De cette manière il n'y a plus d'accumulation possible d'électricité sur le fil de la ligne, mais aussi il ne passe jamais par le

galvanomètre que des courants dérivés. On a soin de donner au conducteur de décharge D une résistance plus grande que celle du galvanomètre, afin que, la roue étant au repos et les interrupteurs étant fermés, la majeure partie du courant émis par le pôle positif de la pile P traverse l'interrupteur (C, C'), arrive au galvanomètre G, et agisse sur l'aiguille aimantée.

Cela posé, mettons la roue en mouvement. Évidemment, à mesure que la vitesse de rotation augmente, la fraction du courant lancé sur la ligne qui passe par l'interrupteur (C, C') et le galvanomètre devient moindre, et, par suite, la déviation de l'aiguille aimantée diminue.

Mais la roue, en s'accélérant, acquiert une vitesse telle que le temps employé par les ressorts à passer sur une lame de platine est égal à celui qu'il faut à l'électricité pour aller d'une extrémité à l'autre du fil de la ligne. Il est facile de voir que, dans ce cas, les ressorts C, C', passent sur un intervalle isolant au moment même où le courant émis en (A, A') commence à arriver en C' ; de plus, le circuit reste rompu en (C, C') pendant un temps égal à celui qu'a duré l'émission de ce courant. Si, à toutes les époques de leur propagation, les courants discontinus occupaient la même longueur sur les fils conducteurs, le flux intermittent d'électricité émis par la pile à travers l'interrupteur (A, A') passerait nécessairement tout entier par le fil de dérivation D tant que la roue conserverait la même vitesse; dès lors le galvanomètre ne recevrait rien, et l'aiguille aimantée, sollicitée par la seule action de la terre, resterait fixe sur le *zéro* de la graduation.

L'expérience montre que le passage du courant à tra-

vers le galvanomètre n'est jamais complétement supprimé, mais que, pour une certaine vitesse de rotation, la déviation de l'aiguille aimantée est *minimum*. Ce fait indique que, pendant leur propagation, les courants discontinus éprouvent une *diffusion* en vertu de laquelle ils occupent, sur les conducteurs qui leur livrent passage, un espace plus grand au point d'arrivée qu'au point de départ. — Du reste, cette déviation *minimum* correspond évidemment au moment où la vitesse de la roue est telle que les ressorts des interrupteurs et le courant mettent le *même temps*, les premiers à passer sur une division de la roue, le second à traverser le fil de la ligne d'un bout à l'autre.

Le nombre n des divisions égales, tant isolantes que conductrices, de la roue étant connu, la longueur e du fil de la ligne, depuis A′ jusqu'à C′, étant déterminée, et le nombre m de tours exécutés par la roue en *une seconde* étant fourni par un compteur au moment où la déviation de l'aiguille est *minimum*, il est facile de calculer la vitesse de propagation de l'électricité. En effet :

Dans *une seconde de temps*, les ressorts parcourent nécessairement m fois n divisions, par conséquent le temps t employé par les ressorts à passer sur une division est

$$t = \frac{1}{mn}.$$

Mais, si nous appelons v la vitesse de l'électricité, nous avons

$$v = \frac{e}{t};$$

d'où, en remplaçant t par sa valeur,

$$v = emn.$$

Quand l'aiguille du galvanomètre est fixe au *minimum* de déviation, au lieu de maintenir la vitesse de la roue constante, accélérons graduellement le mouvement. — D'abord la quantité d'électricité qui passe par le galvanomètre augmente, et atteint un *maximum*. — Puis, cette quantité d'électricité diminue, et tombe à un *minimum;* après quoi elle augmente encore, s'élève à un nouveau *maximum* suivi bientôt d'une diminution, et ainsi de suite. — L'intensité du courant que reçoit le galvanomètre éprouve ainsi une série de variations périodiques, traduites par des changements correspondants dans la déviation de l'aiguille aimantée, qui est alternativement *maximum* et *minimum*. Toutefois les limites de ces oscillations de l'aiguille sont d'autant moins écartées que la vitesse de rotation est plus grande.

En prenant pour *unité* le temps qu'emploie le courant à parcourir le fil de la ligne, il est facile de déterminer les vitesses de la roue correspondantes à ces diverses périodes de déviation *maximum* et *minimum* de l'aiguille. En effet :

L'intensité du courant transmis à travers le galvanomètre G et la déviation de l'aiguille sont *minimum*, chaque fois que les lames de l'interrupteur (C, C′) passent d'une division conductrice à une division isolante au *moment même* où un courant émis en (A, A′) arrive en C′. Or, évidemment, cette condition est réalisée quand le temps que les lames métalliques mettent à parcourir une division de la roue a une des valeurs suivantes : 1, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$, etc.

Au contraire, l'intensité du courant transmis à travers le galvanomètre G et la déviation de l'aiguille sont *maximum*

chaque fois que les lames de l'interrupteur (C, C') passent d'une division isolante à une division conductrice au *moment même* où un courant émis en (A, A') arrive en C'. Or, évidemment, cette condition est réalisée quand le temps que les lames métalliques mettent à parcourir une division de la roue a une des valeurs suivantes : 1/2, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, etc.

MM. Fizeau et Gounelle ont rendu leur appareil expérimental plus sensible, en le modifiant ainsi qu'il suit (Fig. 410).

Trois paires de ressorts, représentant trois interrupteurs distincts, appuient contre la jante de la roue R. Ces interrupteurs sont réglés de telle manière que (A, A') concorde exactement avec (C, C'), et alterne avec (B, B'). Le fil de retour F' est bifurqué en O, communique d'une part avec le bouton C', et d'autre part avec le bouton B'. Les boutons C et B sont mis en communication avec les deux fils d'un galvanomètre différentiel G, et enfin chacun de ces fils avec la terre.

Supposons la roue à l'état de repos. — Si le circuit est fermé en (A, A'), il se trouve aussi fermé à l'autre extrémité, mais seulement par les lames (C, C') ; le courant passe tout entier par le fil du galvanomètre en communication avec le bouton C, l'autre fil ne reçoit rien. — Si le circuit est ouvert en (A, A'), il est fermé à l'autre extrémité, mais seulement par les lames (B, B') ; dans ce cas, d'ailleurs, le fil ne reçoit rien de la pile.

Quand la roue R est en mouvement, le circuit est alternativement fermé et ouvert en (A, A') ; il est, au contraire, toujours fermé à l'autre extrémité de la ligne, tantôt en (C, C'), tantôt en (B, B'). Il en résulte que le fil de la

ligne reçoit par (A, A′) une série de courants discontinus qui, au moment où ils arrivent à l'autre extrémité, trouvent toujours à s'écouler à travers le galvanomètre G, soit par (C, C′), soit par (B, B′).

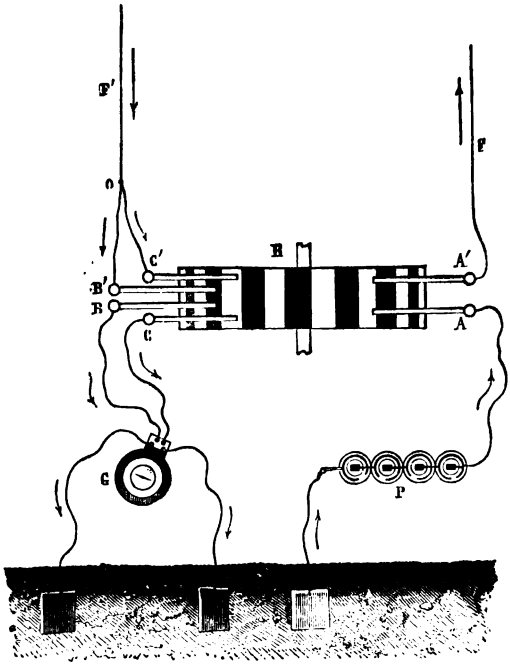


Fig. 410.

De ce que l'électricité met un temps appréciable à parcourir le fil de la ligne, et de ce que tout courant discontinu éprouve une diffusion en vertu de laquelle il occupe sur le conducteur plus de place au point d'arrivée qu'au

point de départ, il résulte que, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue, les courants lancés sur la ligne se partagent à l'autre extrémité du fil en deux portions généralement inégales, dont l'une arrive au galvanomètre par (C, C′) et l'autre par (B, B′). L'aiguille est donc généralement déviée; le sens et l'étendue de la déviation traduisent le sens et l'intensité de la résultante des deux courants opposés qui traversent le galvanomètre. Prenons pour déviation *positive* celle dont le sens correspond à l'action d'un courant transmis au galvanomètre à travers l'interrupteur (C, C′).

Pour une faible vitesse de rotation, la majeure partie du courant passe évidemment par (C, C′), et la déviation de l'aiguille est *positive*. — A mesure que la vitesse s'accélère, la fraction d'électricité transmise par (C, C′) et la déviation *positive* de l'aiguille diminuent ensemble. — Pour une certaine vitesse, le courant passe en proportions égales par (C, C′) et par (B, B′), et l'aiguille, sollicitée pour deux actions égales et de sens contraires, reste fixe sur le *zéro* de la graduation. — Pour une vitesse plus grande, la fraction du courant transmise par (B, B′) l'emporte sur celle qui passe par (C, C′); la déviation de l'aiguille change de sens, et cette déviation *négative* augmente à mesure que le mouvement de la roue s'accélère.

Mais la vitesse de rotation devient assez grande pour que le temps employé par les lames métalliques des interrupteurs à passer sur une division de la roue soit égal au temps que l'électricité met à parcourir le fil de la ligne. Il est évident qu'alors le circuit est interrompu en (C, C′) et fermé en (B, B′) au moment même où le courant émis

en (A, A') commence à arriver à l'autre extrémité O du fil de retour. Dans ce cas, la fraction du courant transmise au galvanomètre par (B, B'), et la déviation *négative* de l'aiguille sont nécessairement, l'une et l'autre, un *maximum*. La longueur *e* du fil de la ligne et le nombre *n* des divisions égales de la roue sont connus; si nous déterminons avec un compteur le nombre *m* de tours de rotation que la roue exécute en une *seconde*, au moment où la déviation *négative* de l'aiguille est *maximum*, nous aurons nécessairement, pour déterminer la vitesse de transmission *v* de l'électricité :

$$v = emn.$$

Au lieu de maintenir la vitesse de rotation constante, accélérons graduellement le mouvement de la roue. L'aiguille passe alternativement d'un *maximum* de déviation *négative* à un *maximum* de déviation *positive*, et réciproquement. En comparant les deux appareils (Fig. 409, 410), il est facile de voir que l'interrupteur (B, B') joue dans le second le même rôle que le fil de décharge D dans le premier. Dès lors la déviation *négative maximum* et la déviation *positive maximum* du second appareil représentent la déviation *minimum* et la déviation *maximum* du premier, et correspondent exactement aux mêmes vitesses de rotation de la roue R. D'ailleurs, avec cette nouvelle disposition comme avec la précédente, l'amplitude des oscillations diminue à mesure que le mouvement de rotation s'accélère.

Le grand avantage de cette dernière disposition de l'expérience est de permettre à l'aiguille du galvanomètre

d'osciller entre des limites beaucoup plus écartées, et de rendre l'observation plus facile.

Il résulte du travail de MM. Fizeau et Gounelle que :

1° Dans un fil de fer dont le diamètre est de 4 millimètres, l'électricité se propage avec une vitesse de 100 000 kilomètres par seconde.

2° Dans un fil de cuivre dont le diamètre est $2^{mm},5$, cette vitesse est de 180000 kilomètres par seconde.

3° Les deux électricités se propagent avec la même vitesse.

4° Le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée, et par conséquent la *tension* de l'électricité et l'*intensité* du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de propagation.

5° Dans les conducteurs de nature différente, les vitesses de propagation ne sont pas proportionnelles aux conductibilités électriques.

6° Lorsque des courants discontinus se propagent dans un conducteur, ils éprouvent une diffusion en vertu de laquelle ils occupent un espace plus grand au point d'arrivée qu'au point de départ.

7° La vitesse de propagation paraît ne pas varier avec la section des conducteurs.

8° Si ce dernier principe est vrai, la vitesse de propagation ne change qu'avec la nature du conducteur, et les nombres précédents représentent les vitesses absolues du courant électrique dans le fer et le cuivre.

Les résultats de MM. Fizeau et Gounelle confirment ce que M. Wheatstone avait déjà dit (tome I, p. 171 et 172) de la vitesse des deux électricités, et les idées qu'il avait

émises sur l'influence de la nature des conducteurs. Mais, en même temps, ils contredisent cette pensée énoncée par M. Wheatstone et par M. Faraday (1), que la vitesse de propagation de l'électricité doit varier avec la tension de la source.

Le tableau suivant contient diverses déterminations de la vitesse de propagation de l'électricité. M. Wheatstone, seul, a opéré avec la décharge de la bouteille de Leyde, tous les autres observateurs ont opéré sur des courants voltaïques. Les chiffres contenus dans ce tableau indiquent les nombres de kilomètres parcourus par l'électricité en *une seconde.*

	Fil de cuivre.	Fil de fer.
Wheatstone.....	460 000 kilom.	
Fizeau et Gounelle.....	180 000	100 000 kilom.
Guillemin et Burnouf.....	»	180 000
Mitchell.....	»	45 600
Walker.....	»	30 000
Astronomes de Greenwich et d'Édimbourg.....	12 200	»
Gould.....	»	25 600
Astronomes de Greenwich et de Bruxelles, fil en grande partie *plongé dans la mer*.....	4 300	»

Les différences énormes qui existent entre ces diverses déterminations ne doivent pas être entièrement rapportées aux difficultés inséparables d'une opération toujours très délicate, ni à des causes d'erreur dont, malgré toute l'habileté des observateurs, les divers procédés d'expérimentation n'auraient pas tous été rendus également indé-

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 423.

pendants. Sur les grandes lignes télégraphiques, la marche de l'électricité est soumise à une source de perturbations signalée par M. Werner Siemens, étudiée avec soin par M. Faraday et par M. Wheatstone, complétement indépendante de la méthode d'observation, et dont l'intensité varie avec le mode d'installation des fils conducteurs. Nous avons vu, en effet (page 83 et suiv.), que, d'après leurs expériences, le courant qui circule dans un fil de télégraphe exerce latéralement une action inductrice sur les conducteurs environnants. Cette action inductrice est très puissante, quand le fil enveloppé de gutta-percha est enfoncé sous terre ou plongé dans l'eau. Dans cette circonstance, le fil et les conducteurs, terre ou eau, dont il n'est séparé que par son enveloppe isolante, représentent les armures d'une bouteille de Leyde. Quand, au contraire, les fils télégraphiques sont librement suspendus dans l'atmosphère, l'induction latérale est très faible, parce que les conducteurs sur lesquels elle peut s'exercer sont généralement très éloignés. Il était naturel de penser que cette induction latérale modifie la marche de l'électricité dans les fils télégraphiques, et cause, dans sa propagation, un ralentissement d'autant plus considérable qu'elle est elle-même plus prononcée.

Les expériences comparatives de M. Faraday (1) sur des fils télégraphiques *aériens et souterrains* de même longueur sont venues confirmer cette manière de voir. — La ligne télégraphique de Londres à Manchester se compose de *quatre* fils enfouis dans le sol, de 600 kilo-

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLI, p. 123. — *Biblioth. univers. de Genève*, 1854, t. XXV, p. 209.

mètres chacun. A la station de Manchester, les extrémités du premier et du second fil communiquaient directement; il en était de même des extrémités du troisième et du quatrième fil. A la station de Londres, M. Faraday avait attaché un premier galvanomètre à l'extrémité du premier fil, avait réuni les extrémités du second et du troisième fil par un second galvanomètre, et enfin avait attaché un troisième galvanomètre à l'extrémité du quatrième fil. Une pile communiquait avec le premier galvanomètre par un de ses pôles, et par l'autre avec la terre; l'extrémité libre du fil du troisième galvanomètre communiquait avec le sol. Le circuit de la pile était ainsi constitué par un fil *souterrain* de 2400 kilomètres de longueur, et par trois galvanomètres *équidistants*, séparés par des intervalles de 1200 kilomètres.

Quand le circuit était fermé, l'aiguille du *premier* galvanomètre était immédiatement déviée; celle du *second* n'était influencée qu'au bout d'un intervalle *sensible;* il s'écoulait environ *deux secondes* avant que celle du *troisième* commençât à se déplacer. — Quand ce circuit était rompu, l'aiguille du *premier* galvanomètre retombait immédiatement à *zéro;* celle du *second* ne commençait à rétrograder qu'un peu de temps après, et celle du *troisième* plus tard encore. — Lorsque la communication du *premier* galvanomètre et de la pile était successivement établie et interrompue, la pile lançait dans le circuit une série d'ondes électriques qui se propageaient indépendamment les unes des autres, et mettaient un temps *appréciable* pour parcourir l'intervalle de deux galvanomètres. — Enfin, quand le fil du *premier* galvanomètre était séparé

de la pile et mis en communication avec le sol, l'électricité dont le fil était chargé s'écoulait par les deux bouts, et les galvanomètres extrêmes accusaient le passage de deux courants de sens contraires.

Les mêmes expériences ont été répétées avec un fil télégraphique librement suspendu dans l'atmosphère, et de même longueur que le fil souterrain. L'œil ne pouvait pas saisir d'intervalle sensible entre les époques de déplacement des aiguilles des trois galvanomètres, tant à l'établissement qu'à la rupture du circuit.

Ces résultats prouvent que la vitesse de propagation de l'électricité est beaucoup plus considérable dans les fils télégraphiques aériens que dans les fils souterrains et sous-marins; ils expliquent le retard considérable qu'éprouve la transmission de l'électricité dans le télégraphe, en partie sous-marin, établi entre Greenwich et Bruxelles. Il est évident aussi que, dans les lignes télégraphiques aériennes, il suffit que, dans une partie de son parcours, le fil se rapproche beaucoup de la terre, ou rase les murailles d'un grand édifice, pour que l'induction latérale devienne plus considérable, et qu'il en résulte un affaiblissement de la vitesse de propagation du courant. On voit, d'après cela, que les circonstances capables de modifier la marche de l'électricité dans un conducteur sont très variées, et de telle nature qu'il est impossible de se mettre à l'abri de leur action perturbatrice; il n'y a donc pas lieu de s'étonner s'il existe de si grandes différences entre les résultats obtenus par les observateurs qui, dans ces dernières années, ont essayé de déterminer la vitesse de propagation de l'électricité.

Les quatre fils du télégraphe souterrain de Manchester étant disposés comme nous l'avons indiqué, M. Faraday a remplacé les trois galvanomètres par trois appareils télégraphiques de Bain. — Dans ce télégraphe, un stylet trace sur une bande de papier en mouvement des *traits bleus* qui correspondent aux temps pendant lesquels le circuit voltaïque reste fermé; ces traits sont séparés par des *intervalles blancs* qui correspondent aux temps pendant lesquels le circuit reste ouvert. — Le circuit était successivement ouvert et fermé entre la pile et le premier appareil. — Quand les interruptions se succédaient lentement, les traits bleus étaient nettement séparés par des intervalles blancs dans les trois télégraphes; les trois appareils marchaient bien. — Pour des interruptions plus rapprochées, la séparation des traits bleus n'était nette que dans le premier appareil; dans les deux autres, ces traits étaient réunis par des lignes bleues plus fines. D'où il résulte évidemment que, dans le second et le troisième appareil, le courant s'était *périodiquement affaibli*, mais n'avait *jamais été complétement interrompu*. — Enfin, pour des interruptions plus rapides encore, le premier appareil marchait toujours régulièrement, mais les deux autres ne traçaient plus qu'une *ligne continue* et d'*épaisseur uniforme*. A ce moment donc, le courant, malgré les interruptions pratiquées à son origine, conservait une intensité *sensiblement constante* dans le deuxième et le troisième appareil. — Après ces dernières expériences, il n'est plus possible de conserver des doutes sur la réalité de la *diffusion* que les courants discontinus éprouvent dans leurs conducteurs, et que

MM. Fizeau et Gounelle avaient déjà signalée dans leurs recherches.

ARTICLE PREMIER.

EFFETS MÉCANIQUES.

Nous avons déjà parlé (tome I, p. 178) des effets mécaniques des décharges d'électricité statique; dans l'article troisième de ce chapitre, à propos de la lumière électrique, nous devrons fixer plus spécialement notre attention sur les transports de matière pondérable qui ont lieu entre les surfaces polaires en présence; nous n'avons à nous occuper ici que des effets mécaniques développés dans les métaux *paramagnétiques* et dans les liquides, pendant le passage du courant électrique.

Action mécanique du courant sur les métaux paramagnétiques. — La propriété dont jouissent les métaux paramagnétiques de rendre un son, quand ils sont soumis à l'influence d'un courant voltaïque, a été constatée, pour la première fois, par M. Page (1) en Amérique, puis vérifiée, en France, par M. Delezenne (2). A partir de cette époque, l'action du courant électrique sur les métaux paramagnétiques a été successivement étudiée par MM. Marian et Matteucci, De la Rive (3), Beatson (4), Guillemin (5), Wart-

(1) *Amer. Journ.*, juillet 1837.

(2) *Biblioth. univers. de Genève*, 1838, t. XVI, p. 406.

(3) *Arch. de l'électricité*, 1845, t. V, p. 200. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1846, t. XVI, p. 93; — 1849, t. XXVI, p. 158. — *Biblioth. univ. de Genève*, 1848, t. IX, p. 193, 265.

(4) *Archiv. de l'électricité*, 1845, t. V, p. 197.

(5) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1846, t. XXII, p. 264, 432.

mann (1). En 1848, M. Wertheim (2) a publié, sur ces phénomènes, un travail important dans lequel il est parvenu à démontrer que ces sons étaient dus à une action *mécanique* du courant voltaïque sur les masses métalliques *paramagnétiques* soumises à son influence. Sans entrer dans le détail des expériences de M. Wertheim, nous nous contenterons de rapporter ici les principaux résultats de ses recherches.

1° Un courant voltaïque passant à travers une hélice exerce, sur une barre de fer placée dans son intérieur, une *traction* mécanique.

2° Cette *traction* est la résultante d'une composante longitudinale et d'une composante transversale.

3° L'action totale est proportionnelle à l'intensité du courant et à la masse du fer.

4° La composante ou *traction* longitudinale existe toujours, et peut, selon la position de l'hélice, tendre à allonger ou à raccourcir la barre de fer.

5° Les composantes ou *tractions* transversales se compensent mutuellement, quand l'axe de la barre de fer coïncide avec l'axe de l'hélice.

6° Un conducteur de fer qui sert à transmettre le courant éprouve *un choc brusque* dans le sens de la propagation de l'électricité. Ce choc explique l'allongement constaté par M. Beatson dans un fil de fer au moment où il livre passage à un courant.

7° Il y a une analogie complète entre l'action du courant

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1846, t. I, p. 419.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1848, t. XXIII, p. 302.

et celle d'une force purement mécanique agissant dans le même sens.

Sous l'influence de courants *discontinus*, les métaux *paramagnétiques* rendent des sons, dont la nature s'accorde avec l'action mécanique de ces courants telle qu'elle est établie dans les propositions précédentes de M. Wertheim. En effet, l'expérience prouve que :

1° Une barre de fer placée dans l'axe d'une hélice électro-dynamique rend un *son longitudinal* très net, de même ton que celui qu'on obtiendrait en la frottant longitudinalement avec un archet.

2° Le *son* rendu par la barre est aussi un son *longitudinal*, quand elle sert elle-même à transmettre le courant.

3° Une barre de fer placée dans une hélice électro-dynamique, mais dans une position excentrique, rend un son *longitudinal* moins pur, accompagné d'un son *transversal* assez faible pour qu'il soit difficile à entendre. A l'œil nu, on peut distinguer les vibrations transversales correspondantes à ce dernier son.

4° Les fils de fer se conduisent absolument comme les barres.

Du reste, ces sons musicaux, rendus seulement par les métaux *paramagnétiques* et sous l'influence de courants *discontinus* extérieurs ou transmis, sont accompagnés de bruits divers, appelés par M. Wertheim *bruits de ferraille* et dont la cause n'est pas exactement connue.

Transport des liquides dans le circuit voltaïque. — Porret (1) a, le premier, appelé l'attention des physi-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1816, t. II, p. 137.

ciens sur les transports de liquides opérés par les courants électriques. Dans ses expériences, le liquide était séparé en deux portions par une membrane organique interposée ; une des cellules était mise en communication avec le pôle positif, et l'autre avec le pôle négatif d'une pile. Le transport du liquide se faisait toujours à travers la cloison poreuse, de la cellule positive à la cellule négative, c'est-à-dire dans le sens du courant lui-même. Ce sujet a été repris par M. Becquerel, et plus récemment par M. James Napier (1) ; ces physiciens ont, tous les deux, vérifié l'exactitude des faits observés par Porret. M. Wiedemann (2) a donné les lois de ces phénomènes, dans un travail fort important dont nous allons rapporter les principaux résultats.

Le liquide est contenu dans un grand vase de verre H (Fig. 411), et dans un vase cylindrique d'argile poreuse *a*, placé dans l'axe du premier. Sur le vase d'argile est mastiquée une cloche de verre C, dont la tubulure est armée d'un tube vertical *d* muni d'un tube latéral d'écoulement *ee*. A l'extérieur et à l'intérieur du vase d'argile *a*, sont deux lames de platine P et *p*, roulées en cylindre et communiquant, par des fils verticaux *l* et *f*, le premier avec le pôle positif, le second avec le pôle négatif d'une pile. La petite ouverture par laquelle le fil *f* sort de la cloche C est fermée avec du mastic ; le tube vertical *d* est aussi mastiqué à la cloche C. B est un flacon destiné à recueillir le liquide transporté.

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1846, t. II, p. 311.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1853, t. XXXVII, p. 242.

Quand le circuit est fermé, le liquide est transporté dans le sens du courant à travers les parois du vase poreux *a*, et s'écoule par le tube *ee*, dans le flacon B. M. Wiedemann

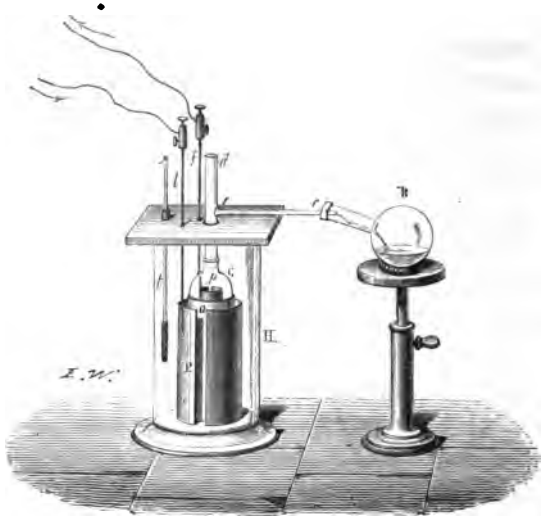


Fig. 411.

a fait varier l'intensité *i* du courant, et a pesé, dans chaque cas, la quantité *q* de liquide transporté dans un temps donné. Il a trouvé ainsi que :

L'étendue et l'épaisseur de la cloison poreuse restant les mêmes, le rapport $\frac{q}{i}$ est *constant*, c'est-à-dire la quantité de liquide transporté est *proportionnelle* à l'intensité du courant employé.

Il a ensuite modifié l'*étendue* de la surface poreuse, en recouvrant une partie du vase d'argile d'une couche iso-

lante et impénétrable au liquide; il a aussi fait varier l'*épaisseur* de la cloison poreuse, et, dans chaque expérience, il a mesuré l'intensité i du courant et la quantité q de liquide transporté. Il a trouvé ainsi que :

Les variations survenues dans l'*épaisseur* de la cloison poreuse et dans l'*étendue* de sa surface exercent la même influence sur l'*intensité* du courant transmis et sur la *quantité* de liquide transporté; en sorte que, dans tous ces cas, le rapport $\frac{q}{i}$ reste *constant*.

Donc, pour une intensité donnée et maintenue *constante* du courant voltaïque, la quantité de liquide transporté reste aussi *constante*, et indépendante de l'épaisseur de la cloison poreuse et de l'étendue de sa surface.

En agissant comparativement sur des liquides différents, M. Wiedemann a reconnu que la quantité de liquide transporté augmente avec la résistance du liquide au passage du courant, mais sans qu'aucune loi simple se manifeste.

M. Wiedemann a eu recours à un autre mode d'expérimentation. Il a remplacé le flacon B par un manomètre à mercure M (Fig. 412), dont le tube horizontal s était abouché avec le tube d'écoulement ee. La partie supérieure du tube vertical d était hermétiquement fermée après l'introduction du liquide. A mesure qu'il était transporté de la surface positive à la surface négative de la cloison poreuse, le liquide pesait sur le mercure dans la courte branche du manomètre, et le refoulait dans la longue branche. En vertu de cette différence de niveau du mercure, le liquide contenu dans le vase poreux supportait

une *pression* qui tendait à le faire repasser dans le vase extérieur H. Quand la colonne mercurielle avait atteint son *maximum* d'élévation, évidemment la *pression hydrostatique* du manomètre poussait à travers le diaphragme poreux, *et en sens inverse*, autant de liquide que le courant lui-même, et faisait équilibre à son *action propre*. La

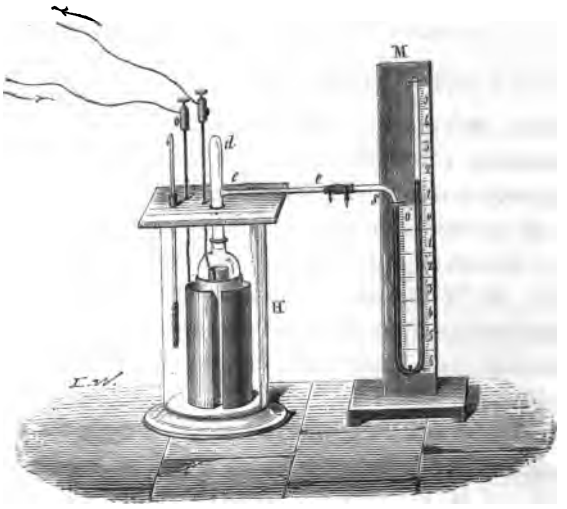


Fig. 412.

pression du manomètre, quand le mercure cesse de monter, peut donc être prise pour la mesure de la force de transport du courant. En déterminant, dans chaque expérience, l'intensité du courant employé et la hauteur *maximum* du mercure dans le manomètre, M. Wiedemann a trouvé que :

La hauteur h à laquelle s'élève le mercure dans le

manomètre est proportionnelle à l'intensité i du courant, à la résistance spécifique r du liquide, à l'épaisseur e du diaphragme poreux, et en raison inverse de l'étendue s de la surface du diaphragme.

En sorte que, c étant une *constante*, l'expression générale de la hauteur de la colonne mercurielle du manomètre, ou de la pression hydrostatique qui sert de mesure à la force du courant, est

$$h = ci\,\frac{er}{s}.$$

Il est facile de voir que cette expression s'accorde parfaitement avec les résultats des expériences précédentes sur les quantités de liquide transporté. En effet, la cloison poreuse peut être considérée comme une réunion de tubes capillaires dont le nombre est proportionnel à l'étendue de sa surface, et dont la longueur est représentée par son épaisseur. Les recherches de M. Wiedemann nous ont appris que l'intensité du courant restant *constante*, la quantité de liquide transporté à travers cette cloison, par l'action propre du courant, reste aussi constante, et indépendante de son étendue superficielle et de son épaisseur. D'autre part, nous savons que les quantités de liquide qui passent, dans un temps donné, à travers les tubes capillaires sont proportionnelles aux pressions, et en raison inverse des longueurs des tubes. La *pression* manométrique, pour produire le même effet que la *force de transport* du courant, c'est-à-dire pour maintenir la quantité de liquide poussé à travers le diaphragme poreux constante et indépendante de ses dimensions en surface et en épaisseur, devait donc croître en raison inverse de

l'étendue superficielle, et en raison directe de l'épaisseur de la cloison perméable interposée.

Cette dernière expression de la force de transport d'un courant d'intensité donnée i donne lieu à un rapprochement important. En effet, la quantité $\frac{er}{s}$ est, à proprement parler, la résistance qu'oppose au passage du courant le liquide qui imbibe la cloison poreuse contre les parois de laquelle sont appliquées les deux lames de platine, l'une en dedans, l'autre en dehors du vase d'argile a. Il résulte de là que la *force de transport* du courant établit entre la surface positive et la surface négative du diaphragme poreux une différence de pression proportionnelle à la quantité $\frac{er}{s}$, ou à la résistance du liquide interposé; mais nous avons vu (page 79) que la différence de tension, ou la force électromotrice partielle du courant, entre ces deux surfaces est aussi proportionnelle à cette résistance $\frac{er}{s}$. On peut donc dire que :

Les actions mécaniques d'un courant voltaïque suivent exactement les mêmes lois que la distribution des tensions électriques dans un circuit fermé.

ARTICLE II.

EFFETS CALORIFIQUES.

Le passage de l'électricité à travers les conducteurs s'accompagne toujours du développement d'une certaine quantité de chaleur, variable avec les conditions de l'ex-

périence. Il nous importe de déterminer comment l'intensité de l'effet calorifique est modifiée par la nature, la longueur, la section des conducteurs, et par la quantité d'électricité transmise, afin d'arriver à la connaissance des lois du dégagement de chaleur produit par les décharges d'électricité statique et par les courants voltaïques.

§ Ier. — Chaleur développée pendant le passage des décharges d'électricité statique.

Nous avons déjà vu (tome I, p. 163) que la décharge d'une batterie élève la température des corps qu'elle traverse. Quand elle passe dans un fil métallique fin, tendu entre les branches de l'excitateur universel, l'élévation de température est assez considérable pour rougir, fondre et volatiliser le métal. L'or, l'argent et le platine, dont les oxydes seraient réduits à cette haute température, sont ramenés à l'état de globules incandescents, ou de poussière impalpable ; le fer, le cuivre, le zinc, le plomb, se combinent avec l'oxygène de l'air, et brûlent avec éclat. Nous savons aussi que, sous l'influence d'une décharge électrique, l'alcool et l'éther s'échauffent, et s'enflamment.

Nous ne dirons rien ici ni des expériences de Cuthberson (1), ni de celles de Van Marum (2), sur l'incandescence des fils métalliques traversés par la décharge d'une batterie électrique, et nous fixerons exclusivement notre

(1) *Bibliothèque britannique*, 1808, t. XXXIX, p. 111.
(2) *Bibliothèque britannique*, 1814, t. LVI, p. 210.

attention sur les travaux de M. Riess (1). Les recherches de ce savant physicien fournissent une détermination expérimentale des lois du dégagement de chaleur produit par le passage des décharges électriques à travers les conducteurs.

L'appareil employé par M. Riess pour mesurer l'élévation de température est un thermomètre à air (Fig. 413), dont le réservoir A est traversé par un fil de platine S con-

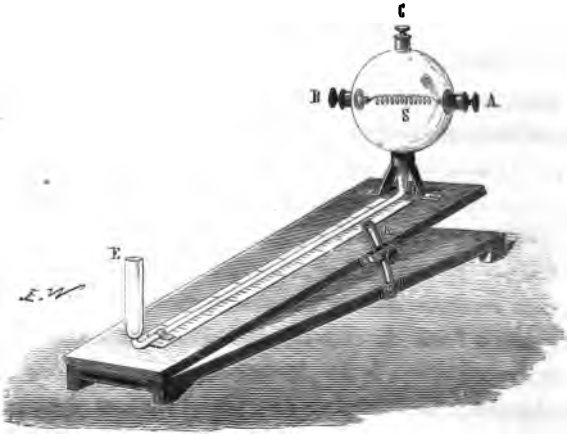


Fig. 413.

tourné en spirale. Ce fil était, dans chaque expérience, traversé par la décharge d'une batterie dont la surface était connue, et dont on avait déterminé bien exactement la charge à l'aide d'une bonne bouteille électrométrique (t. I, p. 154). Le réservoir de ce thermomètre porte trois

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1838, t. LXIX, p. 123.

tubulures armées de boutons métalliques. A et B servent à fixer les extrémités de la spirale S, et à établir les communications avec les garnitures de la batterie ; C permet de renouveler l'air de l'appareil. — On verse dans le tube DE, muni d'une échelle graduée, un liquide dont le déplacement sert à calculer l'élévation de température. — A l'aide de l'arc métallique K et de sa vis de pression, on augmente ou diminue à volonté la sensibilité de l'appareil, en modifiant l'inclinaison de son support.

M. Riess a démontré d'abord que, le circuit extérieur au thermomètre restant le même, l'échauffement d'un fil de platine de longueur et de diamètre déterminés peut être représenté par l'expression

$$\theta = h\frac{Q^2}{s}.$$

Dans cette formule très simple, θ est l'élévation de température du fil, Q la quantité d'électricité accumulée dans la batterie, et s la surface de cette batterie ; enfin, h est une *constante* qui représente l'échauffement qu'aurait déterminé dans le fil une charge électrique égale à l'*unité* et accumulée sur l'*unité* de surface. Cette équation peut être mise sous une autre forme : en effet, $\frac{Q}{s}$ est évidemment la *tension électrique* de la batterie ; en désignant par E cette *tension*, nous aurons

$$\theta = hEQ.$$

Le circuit extérieur restant le même, l'élévation de température qu'éprouve un fil de platine de longueur et de

diamètre déterminés est donc *proportionnelle au produit de la tension électrique de la batterie par la quantité d'électricité qui traverse le fil.*

M. Riess a pris deux fils de platine de *même diamètre* et de *longueurs différentes*. Ces deux fils entraient tous les deux dans le circuit de la décharge, mais ils étaient alternativement placés l'un dans le thermomètre et l'autre au dehors. Il faisait ainsi varier la longueur du fil contenu dans le thermomètre, tout en conservant invariable la résistance totale du circuit traversé par la décharge. Ses expériences lui ont prouvé que :

Dans un circuit de résistance invariable, l'échauffement d'un fil de platine de diamètre invariable est *indépendant de sa longueur.*

M. Riess a cherché ensuite à déterminer l'influence de la grosseur du fil. Pour cela, il a pris deux fils de platine de *diamètres différents* qui entraient tous les deux dans le circuit. Ils étaient alternativement placés, l'un dans le thermomètre, et l'autre au dehors. De cette façon, la résistance totale du circuit restait la même, et le diamètre du fil contenu dans le thermomètre était seul variable. D'expériences de ce genre tentées sur trois paires de fils, il a conclu que :

Dans un circuit de résistance invariable, l'échauffement d'un fil de platine varie *en raison inverse de la quatrième puissance de son rayon.*

En appelant *a* une *constante* qui représente l'échauffement acquis par un fil de platine dont le rayon est égal à l'*unité* pendant la transmission d'une charge d'électricité égale à l'*unité* accumulée sur l'*unité* de surface, l'échauffe-

ment d'un fil de platine de rayon quelconque n, dans un circuit de même résistance, peut être représenté par l'expression :

$$\theta = \frac{a}{n^4}\frac{Q^2}{s},$$

ou

$$\theta = \frac{a}{n^4}\,EQ.$$

La quantité de chaleur communiquée à un semblable fil est égale au produit de θ par sa chaleur spécifique et par son poids. Soient c la chaleur spécifique du fil, d sa densité, l sa longueur : le poids du fil sera $\pi n^2 l d$, et, par conséquent, la quantité de chaleur w communiquée au fil sera nécessairement :

$$w = ac\pi d\,\frac{l}{n^2}\,EQ.$$

Ainsi, dans un circuit de résistance invariable, la quantité de chaleur communiquée à un fil est proportionnelle à sa longueur l et en raison inverse du carré de son rayon n. Comme $\frac{l}{n^2}$ représente la résistance r que le fil employé oppose au passage de l'électricité, en représentant par b la quantité *constante* $ac\pi d$, nous aurons :

(1) $$w = brEQ.$$

D'où il résulte que :

Dans un circuit de résistance invariable, la quantité de chaleur communiquée à un fil métallique varie *proportionnellement à la résistance de ce fil.*

Enfin M. Riess a déterminé l'influence de la résistance

du circuit extérieur au thermomètre sur l'échauffement d'un fil de platine de grosseur et de longueur invariables contenu dans l'appareil. En faisant varier, dans des proportions déterminées, la longueur et la grosseur des fils qui complétaient le circuit de la batterie hors du thermomètre, il a constaté que l'élévation de température du fil *invariable* contenu dans le thermomètre est en raison inverse de la *durée* de la décharge, la *durée* de la décharge étant elle-même *directement* proportionnelle à la *résistance* du circuit, et *inversement* proportionnelle à la tension $E = \frac{Q}{s}$ de la batterie. Par conséquent, en désignant par t la durée de la décharge, par f une quantité *constante*, et par R la résistance du circuit entier, nous aurons

$$t = f\frac{R}{E}.$$

L'équation (1) exprime la quantité de chaleur produite dans un fil dont la résistance est r, et faisant partie d'un circuit *invariable*. De cette équation, de ce que nous avons dit de l'influence de la durée de la décharge, et de l'expression de cette durée, il résulte que :

Dans un circuit métallique dont la résistance *totale* est R, la quantité de chaleur développée dans une section quelconque du circuit dont la résistance *partielle* est r est représentée par l'expression

$$w = \frac{brEQ}{f\frac{R}{E}}.$$

Ou, en appelant k la quantité *constante* $\frac{b}{f}$,

$$w = k\frac{r}{R}E^2Q. \qquad (2)$$

Mais, d'une part, la résistance totale du circuit est égale à la somme des résistances partielles des diverses sections dont il se compose, et, d'autre part, la quantité *totale* de chaleur développée dans le circuit entier est égale à la somme des quantités de chaleur développées dans chaque section. Si nous désignons par W la quantité totale de chaleur produite par la décharge pendant son passage à travers le circuit entier, nous aurons la valeur de W en remplaçant r par R, dans le second membre de l'équation (2); ce qui donne :

$$W = kE^2Q. \qquad (3)$$

L'équation (3) prouve que la quantité *totale* de chaleur produite par une décharge est *indépendante* de la résistance du circuit parcouru, et qu'elle est *proportionnelle* à la *quantité* d'électricité transmise pendant la décharge et au *carré de la tension électrique* de la batterie.

L'équation (2) prouve que la quantité de chaleur produite dans une section quelconque du circuit est une fraction de la chaleur *totale* développée par le passage de la décharge à travers le circuit entier; cette fraction est elle-même proportionnelle au rapport $\frac{r}{R}$ de la résistance *partielle* de la section considérée à la résistance *totale* du circuit entier.

§ II. — Chaleur développée pendant le passage des courants voltaïques.

Les effets calorifiques des courants voltaïques ont depuis longtemps attiré l'attention des physiciens. Children (1) a publié un travail intéressant sur ce sujet; plus tard M. De la Rive (2) et Peltier (3) ont repris cette étude. Mais c'est réellement à M. Joule (4), et aux physiciens qui ont marché dans la voie ouverte par ses importants travaux, que nous devons la connaissance des lois du dégagement de chaleur produit par le passage d'un courant électrique à travers un conducteur quelconque.

Pour estimer la quantité de chaleur dégagée pendant le passage d'un courant à travers un conducteur métallique, M. Joule introduisait un fil métallique dans un tube de verre délié; puis il enveloppait le tube avec le fil contourné en spirale serrée, de manière pourtant qu'il restât un petit espace entre chaque tour de spire. Le tube et le fil métallique étaient alors plongés dans une éprouvette contenant une quantité connue d'eau; les deux bouts du fil, tirés hors du liquide, étaient mis en communication avec les pôles d'une pile. M. Joule s'assurait que toute l'électricité passait à travers le fil, et qu'aucun courant dérivé ne s'établissait dans le liquide. La chaleur

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1816, t. I, p. 109.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1829, t. XL, p. 371; — 1836, t. LXII, p. 193.

(3) *Ann. de chimie et de phys.*, 2e série, 1834, t. LVI, p. 371.

(4) *Archives de l'électricité*, 1842, t. II, p. 54.

dégagée par le courant pendant son passage à travers le fil était déduite, par les moyens ordinaires, de la variation de température et de la masse de l'eau dans laquelle le fil métallique était plongé.

Les expériences de M. Joule ont établi que :

Lorsqu'un courant d'électricité voltaïque est propagé le long d'un conducteur métallique, la quantité de chaleur dégagée dans l'*unité* de temps est proportionnelle au produit de la résistance du conducteur par le carré de l'intensité du courant.

Si donc a est une *constante*, r la résistance du fil métallique, I l'intensité du courant, w la quantité de chaleur dégagée dans l'*unité* de temps par le passage du courant à travers le fil, nous aurons

$$w = ar\mathrm{I}^2.$$

L'exactitude de cette loi a été confirmée par les recherches de M. Ed. Becquerel (1) et de M. Botto (2). Le procédé expérimental suivi par M. Ed. Becquerel est au fond le même que celui de M. Joule.

Les résultats des recherches de M. Joule et de M. Ed. Becquerel prouvent que cette loi est applicable à l'échauffement des liquides traversés par les courants électriques, à la condition d'ajouter à la chaleur accusée par l'élévation de température du liquide celle qui a été employée à séparer ses éléments dans le cas de décomposition. Ainsi :

Dans le cas de décomposition électro-chimique, la

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1843, t. IX, p. 21.
(2) *Archives de l'électricité*, 1843, t. V, p. 353.

somme des quantités de chaleur nécessaires pour déterminer l'élévation de température observée et la séparation des éléments rendus libres autour des électrodes, ou, en d'autres termes, la quantité *totale* de chaleur dégagée dans l'*unité* de temps, est proportionnelle au produit de la *résistance* du liquide par le *carré* de l'intensité du courant.

Ajoutons enfin que, d'après les expériences de M. Joule, cette dernière loi s'applique aussi au développement de chaleur dans chacun des couples d'une pile en action.

Ces faits nous montrent que la quantité de chaleur développée par le passage de l'électricité voltaïque dans un corps quelconque dépend de la résistance du corps et de l'intensité du courant; et nous ne faisons que résumer les résultats de toutes ces recherches en disant:

Dans l'*unité* de temps, la quantité *totale* de chaleur développée dans une section quelconque d'un circuit voltaïque fermé, y compris la pile elle-même, est proportionnelle au produit de la *résistance* de cette portion du circuit par le *carré* de l'intensité du courant.

Dès lors, w représentant la quantité de chaleur développée dans l'*unité* de temps par un courant d'intensité I, dans une section du circuit dont la résistance partielle est r, nous avons:

$$w = a\,r\,I^2. \qquad (1)$$

Et, comme la somme des quantités de chaleur développées dans chaque section du circuit est évidemment égale à la *chaleur totale* W produite dans le circuit entier dont la résistance totale est R, nous aurons, pour expri-

mer cette quantité totale de chaleur développée dans le circuit, dans l'*unité* de temps :

$$W = aRI^2. \tag{2}$$

Mais nous savons que I est le rapport de la force électromotrice E du courant à la résistance totale du circuit; en remplaçant I par sa valeur $\frac{E}{R}$ dans les deux équations précédentes, nous aurons :

Pour exprimer la *chaleur totale* développée, dans l'*unité* de temps, dans le circuit *tout entier :*

$$W = a\frac{E^2}{R}. \tag{3}$$

Pour exprimer la quantité w de chaleur développée dans l'*unité* de temps, dans une *section de résistance r* de ce circuit :

$$w = a\frac{r}{R}\frac{E^2}{R}. \tag{4}$$

Il résulte de l'équation (3) que :

1° La quantité *totale* de chaleur développée dans l'*unité* de temps et dans un circuit de résistance *constante*, par un courant dont la force électromotrice *varie*, est proportionnelle au *carré* E^2 de la force électromotrice, tandis que la déviation de l'aiguille aimantée et l'action électrolytique sont proportionnelles à la première puissance E de cette force électromotrice.

2° La quantité totale de chaleur produite dans l'*unité* de temps et dans un circuit de résistance *variable*, par un courant dont la force électromotrice reste *constante*, est en

raison inverse de la résistance totale du circuit. La déviation de l'aiguille aimantée et l'action électrolytique suivent la même loi.

Il résulte enfin de l'équation (4) que :

La quantité *totale* de chaleur développée dans l'*unité* de temps, dans une section quelconque du circuit, est une fraction de la chaleur *totale* développée dans le circuit tout entier ; cette fraction est elle-même proportionnelle au rapport $\frac{r}{R}$ de la *résistance partielle* de la section considérée à la *résistance totale* du circuit.

Si nous laissons marcher la pile pendant un temps quelconque t, la quantité de chaleur dégagée dans le circuit tout entier sera :

$$W = a\frac{E^2}{R}t. \tag{5}$$

La quantité de chaleur dégagée dans une section de *résistance r* de ce circuit sera :

$$w = a\frac{r}{R}\frac{E^2}{R}t. \tag{6}$$

Mais, pour une force électromotrice constante, la quantité d'électricité qui traverse le circuit dans un temps quelconque est proportionnelle à ce temps, et en raison inverse de la résistance de ce circuit. En appelant Q cette quantité d'électricité et b une *constante*, nous aurons

$$Q = b\frac{t}{R};$$

d'où

$$t = \frac{1}{b}QR.$$

Remplaçant t par sa valeur dans les équations (5) et (6), et appelant c la quantité *constante* $\frac{a}{b}$, nous aurons :

Pour la quantité *totale* de chaleur dégagée dans le circuit entier :

$$W = cE^2Q; \tag{7}$$

Pour la quantité de chaleur dégagée dans une section de *résistance* r de ce circuit :

$$w = c\frac{r}{R}E^2Q. \tag{8}$$

L'équation (7) prouve que la quantité totale de chaleur produite par un courant électrique est indépendante de la *nature* et de la *résistance* du circuit, et qu'elle est proportionnelle *à la quantité d'électricité qui passe et au carré de la force électromotrice* de la pile.

L'équation (8) prouve, comme nous le savions déjà par l'équation (4), que la quantité de chaleur développée dans une section quelconque du circuit est une fraction de la chaleur *totale* produite dans le circuit entier, et que cette fraction est elle-même proportionnelle au rapport $\frac{r}{R}$ de la résistance *partielle* de la section considérée à la résistance *totale* du circuit.

Il y a identité complète entre les équations (7) et (8) et les équations (3) et (2) de la page 427. Or nous savons que ces deux dernières équations représentent les quantités de chaleur développées, dans le circuit *entier* et dans une *section quelconque* de ce circuit, par le passage d'une décharge d'électricité statique. Les lois du dégagement de

la chaleur dans un circuit métallique traversé par l'électricité sont donc les mêmes pour les *courants voltaïques* et pour les *courants de décharge des batteries électriques.*

D'où l'on peut conclure avec M. Joule que :

Si une certaine quantité Q d'électricité voltaïque ayant une vitesse V produit une certaine quantité de chaleur en passant dans un conducteur donné, et si la *même quantité de chaleur* est produite dans le *même fil* par la décharge d'une batterie qui a lancé une quantité Q′ d'électricité avec une vitesse V′, ces quatre quantités doivent satisfaire à la relation suivante :

$$Q : Q' :: V' : V,$$

d'où

$$QV = Q'V'.$$

Les quantités d'électricité fournies par ces deux sources différentes et produisant le même effet calorifique, seront donc en raison inverse de leurs vitesses respectives, ou, en d'autres termes, le produit de la quantité d'électricité voltaïque par la vitesse du courant sera égal au produit de la quantité d'électricité de la batterie par sa vitesse de propagation.

Origine de la chaleur développée par les courants voltaïques. — Des nombreuses questions qui se rattachent à l'histoire de l'électricité dynamique, celle-ci est certainement une des plus importantes ; sa solution peut jeter un grand jour sur la théorie générale des piles hydro-électriques.

A la suite de son beau travail sur les lois du dé-

gagement de la chaleur par les courants électriques, M. Joule (1) avait posé les conclusions suivantes :

« 1° Les plaques métalliques d'un couple voltaïque » d'intensité donnée étant mises en communication » par un corps simplement conducteur quelconque, la » chaleur totale voltaïque dégagée par le circuit entier » (toujours en supposant qu'aucune action locale n'a » lieu dans le couple) sera, quelle que soit la résistance » de conductibilité, *proportionnelle au nombre d'atomes* » *d'eau ou de zinc employés à produire le courant.*

» 2° La chaleur voltaïque totale qui est produite par un » couple donné est en proportion directe avec son in- » tensité et *le nombre des atomes qui y sont électrolysés.*

» 3° Lorsque le courant produit par la pile voltaïque, » soit simple, soit composée, passe au travers d'une sub- » stance quelconque, qu'elle soit ou non un électrolyte, » la chaleur voltaïque totale qui est développée dans un » temps donné est *proportionnelle au nombre des atomes* » *qui sont électrolysés dans chaque couple du circuit*, multi- » plié par l'intensité virtuelle de la pile. »

La pensée du savant physicien anglais n'est pas douteuse; pour lui, la chaleur produite par le courant voltaïque dans le circuit qu'il traverse n'a pas d'autre source que l'action chimique accomplie dans l'électromoteur lui-même. Cette manière d'interpréter les phénomènes est une conclusion logique des lois découvertes par M. Faraday; cependant une vérification expérimentale des principes énoncés par M. Joule était nécessaire.

(1) *Archives de l'électricité*, 1842, t. II, p. 54.

M. Matteucci (1), dans un travail sur *la relation qui existe entre la quantité d'action chimique et la quantité de chaleur, d'électricité et de lumière qu'elle produit*, était arrivé à cette conclusion que : la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique, lorsqu'elle est accompagnée de la *production d'un courant*, développe plus de chaleur que lorsqu'elle se fait *sans production de courant*. Ce résultat était de nature à jeter quelques doutes sur l'exactitude des principes posés par M. Joule.

Cependant, dans tout électromoteur hydro-électrique, les liquides et les métaux réagissent chimiquement les uns sur les autres; cette action des forces moléculaires représente un *travail dépensé* qui donne naissance au courant électrique. De son côté, le courant surmonte les résistances qu'il rencontre sur son passage. Ce courant accomplit donc *un travail* dans le circuit qu'il traverse. Quand le courant *n'exerce et ne supporte aucune action extérieure*, du moment que la circulation est uniforme, le *travail dépensé* dans l'intérieur de l'électromoteur doit être égal au *travail produit* par le courant lui-même dans le circuit tout entier. Mais nous pouvons prendre la quantité de chaleur correspondante aux actions chimiques effectuées dans l'électromoteur pour mesure du *travail dépensé*, et la quantité de chaleur développée dans le circuit tout entier pour mesure du *travail accompli* par le courant. Dès lors, ces deux quantités de chaleur doivent être égales.

M. Favre (2) a repris, dans ces derniers temps, l'étude

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1847, t. IV, p. 375.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XL, p. 293. — *Compt. rend. de l'Acad. des sciences*, 1854, t. XXXIX, p. 1212.

expérimentale de cette importante question. Les résultats dont ses recherches ont enrichi la science fournissent à la fois une complète confirmation des principes de M. Joule, et une démonstration décisive de l'exactitude des idées émises par M. Faraday sur l'origine chimique de la force électromotrice. Nous regrettons vivement de ne pouvoir pas donner ici, dans tous ses détails, le procédé expérimental suivi par M. Favre; nous devons nous contenter de dire que toutes ses recherches ont été faites dans le calorimètre à mercure imaginé par MM. Favre et Silbermann, et dont ces deux habiles expérimentateurs avaient déjà fait de si heureuses applications dans leurs études sur la chaleur dégagée dans les actions chimiques et moléculaires. Dans la première partie de son travail, M. Favre n'avait opéré qu'avec un couple platine et zinc amalgamé plongés dans de l'acide sulfurique étendu d'eau; le circuit du couple était complété par des arcs métalliques de résistance connue et variable. Dans la seconde partie, il a employé une pile composée de cinq couples semblables, et alors il a pu introduire dans le circuit interpolaire, tantôt un voltamètre à eau acidulée, tantôt un voltamètre à dissolution de sulfate de cuivre.

Des expériences préalables avaient fourni à M. Favre les résultats suivants:

Chaleur dégagée par l'oxydation d'*un équivalent* de zinc *amalgamé*	42803 calories.
Chaleur dégagée par la combinaison de cet oxyde avec un équivalent d'acide sulfurique	10455
Chaleur absorbée par la décomposition d'*un équivalent* d'eau	34462

Mais le zinc *amalgamé* plongé dans l'acide sulfurique étendu d'eau s'oxyde aux dépens de l'oxygène de l'eau décomposée. Par conséquent, la dissolution d'*un équivalent* de zinc *amalgamé* dans l'acide sulfurique étendu d'eau, c'est-à-dire la transformation d'*un équivalent* de zinc *amalgamé en sulfate dissous*, produit une quantité de chaleur égale à

$$42803 + 10455 - 34462 = 18796 \text{ calories.}$$

L'appareil électromoteur, couple simple ou pile de cinq éléments, était tout entier plongé dans le calorimètre à mercure. D'abord M. Favre a réuni les pôles avec un fil de cuivre très gros et très court ; le circuit interpolaire n'opposait donc pas de résistance sensible à la transmission de l'électricité, et l'électromoteur pouvait être considéré comme fermé sur lui-même sans circuit interpolaire. Il a trouvé ainsi que :

Dans un électromoteur fermé sur lui-même, la quantité de chaleur dégagée ne dépend que de la quantité de zinc dissous dans l'acide sulfurique, la sulfatation d'un équivalent de zinc amalgamé produisant toujours dans l'appareil 18796 unités de chaleur.

Que l'action de l'acide sulfurique sur le zinc s'accompagne ou non de la production d'un courant électrique, la quantité de chaleur dégagée par la dissolution d'un équivalent de zinc est donc toujours la même.

M. Favre a introduit ensuite dans le circuit de l'électromoteur tantôt un fil de platine long et mince, tantôt un voltamètre à eau ou à sulfate de cuivre. L'appareil électromoteur et le circuit interpolaire étaient tous deux

placés en entier dans le calorimètre, qui donnait ainsi la chaleur totale dégagée dans l'opération. Il a trouvé que :

Quelles que soient la nature et la résistance du circuit interpolaire (pourvu que, dans le cas de l'emploi des voltamètres, on tienne compte de la chaleur employée à opérer la décomposition électro-chimique), la dissolution d'un équivalent de zinc amalgamé dans l'électromoteur s'accompagne du développement d'une quantité *totale* de chaleur, distribuée à la fois dans l'électromoteur et dans le circuit interpolaire, qui est égale à 18796 calories.

Ici donc encore la quantité de chaleur dégagée est exactement la même que celle qu'aurait fournie la dissolution d'un équivalent de zinc sans production de courant électrique.

Ces résultats, en prouvant expérimentalement que la quantité de chaleur développée dans un circuit voltaïque est toujours égale à celle qui correspond à l'action chimique accomplie dans l'électromoteur, démontrent l'exactitude des propositions émises par M. Joule. En même temps, ils montrent que, conformément aux indications de la formule (7) de la page 433, la quantité totale de chaleur développée dans un temps donné, par un courant électrique, est indépendante de la nature et de la résistance du circuit, et dépend *seulement* de la quantité d'électricité transmise et de la force électromotrice du courant.

Enfin M. Favre, par une ingénieuse disposition de son appareil instrumental, a mesuré séparément les quantités de chaleur développées dans l'électromoteur et dans le circuit interpolaire. Il a trouvé ainsi que :

1° Conformément à ce qu'on pouvait prévoir, en raison

de l'indépendance de la quantité de chaleur totale développée et de la résistance du circuit, la chaleur produite dans l'électromoteur et la chaleur produite dans l'arc interpolaire sont deux quantités complémentaires ; leur somme représente toujours exactement la chaleur correspondante à la dissolution du zinc attaqué dans l'électromoteur pendant le passage du courant.

2° La chaleur totale développée dans le circuit se divise en deux portions, l'une *localisée dans l'arc interpolaire*, l'autre *dans l'électromoteur*. Le rapport de la première de ces portions à la seconde est d'autant plus grand que la résistance de l'arc interpolaire, quelle que soit sa nature, est elle-même une fraction plus considérable de la résistance totale du circuit voltaïque.

Il est donc expérimentalement démontré par les recherches de M. Favre que :

1° La quantité de chaleur développée par un courant voltaïque est exactement égale à celle que produit l'action chimique accomplie dans l'électromoteur, et n'a pas d'autre source que cette action chimique elle-même.

2° En augmentant ou diminuant le rapport de la résistance de l'arc interpolaire à la résistance totale du circuit, on peut à volonté faire qu'une portion plus ou moins grande de cette chaleur totale se manifeste dans l'arc lui-même, ou reste localisée dans l'électromoteur.

Cette dernière conséquence des travaux de M. Favre est la vérification expérimentale des indications fournies par la formule (8), page 433 ; elle confirme la proposition suivante énoncée par M. de La Rive dès 1843 (1) :

(1) *Archives de l'électricité*, 1843, t. III, p. 178.

« Quand on se sert d'un seul couple dont le courant » traverse des fils métalliques plus ou moins fins, la » somme des quantités de chaleur développées dans le fil » et dans le liquide du couple est constante pour une » même quantité d'électricité : seulement, *suivant la gros-* » *seur du fil, c'est tantôt l'une et tantôt l'autre de ces deux* » *quantités qui est la plus considérable; et ce qui semble* » *toujours déterminer le degré de réchauffement des diffé-* » *rentes parties d'un circuit voltaïque, c'est la résistance* » *qu'elles présentent.* »

Nous avons supposé jusqu'ici que *tout le travail accompli* par le courant était employé à surmonter les résistances du circuit voltaïque. Considérons maintenant le cas où le courant exerce une action extérieure, et produit par conséquent *un certain travail en dehors de son propre circuit*. Du moment que la circulation de l'électricité est uniforme, le *travail dépensé* dans l'électromoteur doit toujours être égal au *travail total* accompli par le courant. Par conséquent, la quantité de chaleur correspondante aux actions chimiques effectuées dans l'électromoteur doit l'emporter sur la quantité de chaleur développée dans le circuit voltaïque, et leur différence doit être l'*équivalent* du *travail accompli* par le courant *en dehors de son propre circuit*. Dans cette circonstance, le courant doit s'affaiblir, mais il doit se régler dans son intensité de manière que la condition précédente soit satisfaite.

M. Favre (1) a publié une série de recherches dont les

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1857, t. XLV, p. 56.

résultats confirment l'exactitude de cette dernière déduction de la théorie mécanique de la chaleur.

L'électromoteur employé était composé de cinq couples zinc amalgamé et platine platiné plongés dans de l'acide sulfurique étendu d'eau. Le courant mettait en mouvement un électro-aimant, qui, à son tour, servait à soulever un poids. La pile et l'électro-aimant, placés dans deux calorimètres différents, communiquaient à l'aide de fils de cuivre recouverts de gutta-percha d'un diamètre tel que leur résistance était négligeable. Des poulies placées en dehors des calorimètres transmettaient le mouvement de l'électro-aimant au poids à soulever.

Lorsque l'électro-aimant n'était pas en communication avec le système des poulies, c'est-à-dire lorsque tout le travail du courant restait localisé dans les calorimètres, la somme des quantités de chaleur recueillies dans les deux calorimètres représentait exactement la quantité de chaleur développée par la dissolution du zinc dans la pile de cinq couples.

Mais, lorsque l'électro-aimant communiquait avec le système des poulies, le courant produisait hors des calorimètres un *travail mécanique* représenté par un poids élevé à une certaine hauteur. Dans ce cas, la somme des quantités de chaleur recueillies dans les calorimètres était toujours inférieure à la quantité de chaleur correspondante à la dissolution du zinc dans la pile de cinq couples. Il y avait donc une certaine quantité de chaleur *perdue*, qui, d'après les principes de la théorie mécanique de la chaleur, devait être l'*équivalent* du *travail mécanique* accompli en dehors des calorimètres.

Prenons, pour *unité de chaleur*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'*un* degré centigrade la température d'*un* kilogramme d'eau, et, pour *unité de travail mécanique*, le travail nécessaire pour élever *un* kilogramme à *un* mètre de hauteur ou le *kilogrammètre*. Si nous divisons le travail mécanique accompli hors des calorimètres par la quantité de chaleur perdue, le quotient doit représenter l'*équivalent mécanique* de la chaleur, c'est-à-dire le nombre de *kilogrammètres* que peut produire *une unité* de chaleur.

Il résulte des expériences de M. Favre que l'*équivalent* mécanique de la chaleur est compris entre 426 et 464 *kilogrammètres*, et s'élève moyennement à 444.

Pour faire comprendre toute l'importance des recherches de M. Favre, il suffit de rapprocher ce dernier résultat des diverses évaluations de l'*équivalent mécanique* de la chaleur données par M. Joule (1).

Équivalent mécanique de la chaleur déterminé.....	Au moyen de la compression des gaz.....	452 kilogrammètres. 437 451 447 418
	Au moyen de la dilatation des gaz.....	441
	Au moyen du frottement de l'eau contre l'eau.....	430,36
	Au moyen du frottement du mercure contre le mercure..	432,40
	Au moyen du frottement de la fonte de fer contre la fonte de fer.....	432,78 431,66
	Moyenne générale....	437,32

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXV, p. 118 et suivantes.

Ainsi, tandis que les expériences de M. Joule fixent à 437 kilogrammètres l'équivalent mécanique de la chaleur, les recherches de M. Favre donnent 444 kilogrammètres pour valeur moyenne de cet équivalent.

Les travaux de M. Favre démontrent donc d'une manière incontestable l'exactitude des principes suivants :

1° La totalité du *travail dépensé* dans la pile pour donner naissance au courant est représentée par la somme des actions chimiques accomplies dans les éléments voltaïques.

2° Quand le courant produit n'exerce et ne supporte aucune action *extérieure*, son intensité est toujours assez grande pour que la *chaleur dégagée dans le circuit* soit l'*équivalent* du *travail dépensé* dans l'électromoteur.

3° Quand le courant exerce une action *extérieure*, son intensité s'affaiblit, mais reste toujours assez grande pour que le *travail dépensé* dans l'électromoteur soit égal à la *somme* du *travail extérieur* et du *travail* que représente la *quantité de chaleur* développée dans le circuit voltaïque.

Les recherches de M. Favre lui ont permis de faire des rapprochements très importants entre l'action chimique accomplie dans le couple hydro-électrique et la quantité de chaleur que le courant développé peut produire sur son trajet; cette partie de son travail jette un jour nouveau sur la théorie des piles hydro-électriques. Les physiciens savent que le couple de Wollaston,

$$\frac{\text{zinc amalgamé — cuivre}}{\text{acide sulfurique étendu}},$$

et le couple de Daniell,

$$\frac{\text{zinc amalgamé — cuivre}}{\text{acide sulfurique étendu — sulfate de cuivre}},$$

sont, l'un et l'autre, insuffisants pour opérer la décomposition de l'eau, tandis que le courant fourni par un seul couple de Grove,

$$\frac{\text{zinc amalgamé — platine}}{\text{acide sulfurique étendu — acide azotique}},$$

décompose l'eau. Des résultats de M. Favre découle une explication très simple de cette supériorité du couple de Grove sur celui de Wollaston et sur celui de Daniell.

La combinaison d'*un* équivalent d'hydrogène avec *un* équivalent d'oxygène produit 34462 unités de chaleur ; quel que soit le moyen employé pour l'opérer, la décomposition d'*un* équivalent d'eau entraîne donc nécessairement une perte de 34462 calories. D'ailleurs, les lois de l'action électrolytique définie montrent (tome I, p. 529) que, pour *un* équivalent d'eau décomposée dans le voltamètre interpolaire, il y a toujours *un* équivalent de zinc dissous dans chacun des couples de l'électromoteur.

Dans le couple de Wollaston, l'action chimique génératrice du courant est la dissolution du zinc amalgamé dans l'acide sulfurique étendu. Nous savons, d'autre part, que la dissolution d'*un* équivalent de zinc amalgamé produit 18796 calories. Par conséquent, le courant fourni par *un seul* couple de Wollaston ne peut développer, en un point quelconque de son trajet, que 18796 unités de chaleur, c'est-à-dire à peu près la moitié de la quantité de

chaleur nécessaire pour opérer la décomposition d'*un* équivalent d'eau. Il n'est donc pas étonnant qu'avec *un seul* couple de Wollaston, on ne puisse pas décomposer l'eau.

Dans le couple de Daniell, l'action chimique génératrice du courant se compose (tome I, p. 565) d'une action *positive*, la dissolution du zinc amalgamé dans l'acide sulfurique étendu, et d'une action *négative*, la réduction du sulfate de cuivre. Or la sulfatation d'*un* équivalent de zinc amalgamé *produit* 53258 calories, tandis que la réduction d'un équivalent de sulfate de cuivre, d'après les déterminations de M. Favre, *absorbe* 29605 calories. Par conséquent, le courant fourni par *un* seul couple de Daniell ne peut développer, en un point quelconque de son trajet, que 53258 — 29605 = 23653 unités de chaleur; il est donc tout simple que ce courant ne puisse pas opérer la décomposition de l'eau.

Dans le couple de Grove, l'action chimique génératrice du courant se compose (tome I, p. 565) d'une action *positive*, la sulfatation du zinc qui *produit* toujours 53258 calories, et d'une action *négative*, la réduction de l'acide azotique. On peut admettre que l'acide azotique AzO^5 est transformé en $AzO^2 + O^3$, auquel cas sa réduction, d'après les déterminations de M. Favre, *absorberait* 6885 calories pour la mise en liberté d'*un* équivalent d'oxygène; on peut admettre aussi que l'acide azotique AzO^5 est transformé en $AzO^3 + O^2$, auquel cas sa réduction *absorberait* 13634 calories pour la mise en liberté d'*un* équivalent d'oxygène. Il est probable que ces deux réactions s'accomplissent à la fois dans le couple de Grove, mais il serait difficile de déter-

miner laquelle des deux est prédominante. Dans tous les cas, les considérations précédentes fournissent deux limites, entre lesquelles est comprise la quantité de chaleur produite par l'action chimique génératrice du courant dans le couple de Grove. Cette quantité de chaleur ne saurait dépasser 53258 — 6885 = 46373 calories, et ne saurait être moindre que 53258 — 13634 = 39624 calories. Ainsi donc le courant fourni par *un* seul couple de Grove peut développer, en un point quelconque de son trajet, une quantité de chaleur comprise entre 39624 et 46373 calories ; ce résultat explique très bien pourquoi ce courant est capable d'opérer la décomposition de l'eau.

Après ce que nous venons de dire, il est facile de comprendre pourquoi il suffit d'ajouter de l'acide azotique à l'acide sulfurique étendu qui compose le liquide actif de la pile de Wollaston, pour rendre l'action chimique du courant plus intense. Cette addition a évidemment pour effet de rendre plus considérable la quantité de chaleur que produit la dissolution du zinc, et que le courant peut utiliser en un point quelconque du circuit pour opérer la décomposition des électrolytes qu'il traverse.

M. J. Regnauld (1) a pris pour point de départ les travaux de M. Favre, et a présenté sous un jour nouveau l'étude des rapports qui existent entre l'action chimique génératrice et la force électromotrice d'un courant. Il a pris la quantité de chaleur *dégagée* dans une action chimique quelconque pour mesure de l'affinité des éléments en présence, et il a cherché si les rapports des forces élec-

(1) *Recherches sur les forces électromotrices.* Paris, 1855, p. 53.

tromotrices des divers couples ne sont pas les *mêmes* que les rapports des quantités de chaleur développées ou des affinités mises en jeu dans l'intérieur de ces couples. Or, d'après ce que nous avons vu plus haut :

Le rapport des quantités de chaleur développées dans le couple de Grove et dans le couple de Daniell est compris entre

$$\frac{46373}{23653} = 1{,}961$$

et

$$\frac{39624}{23653} = 1{,}675;$$

tandis que le rapport des forces électromotrices de ces deux couples est, page 139, d'après les mesures de M. J. Regnauld :

$$\frac{310}{179} = 1{,}731.$$

Ce résultat nous conduit naturellement à cette conclusion, que :

Si l'on prend la quantité de chaleur développée dans une action chimique pour mesure de l'affinité des éléments en présence, la force électromotrice d'un couple est proportionnelle à la somme des affinités mises en jeu dans l'action chimique génératrice du courant.

Mais, avant d'admettre un semblable principe comme général, il serait nécessaire, ainsi que le fait très judicieusement observer M. J. Regnauld, de comparer un grand nombre de couples dans lesquels des métaux très différents pris pour éléments positifs seraient attaqués par

divers liquides actifs. Malheureusement, cette comparaison n'est pas possible dans l'état actuel de la science, parce que la chaleur d'oxydation de ces métaux n'est pas encore connue.

Influence de l'amalgamation du métal positif du couple. — Il résulte des observations de M. J. Regnauld (1) que la force électromotrice des couples dont le métal *positif* est du *zinc amalgamé* l'emporte sur celle des mêmes combinaisons voltaïques dont le métal *positif* est du *zinc pur*. L'explication qu'il a donnée de cette supériorité du zinc amalgamé rentre dans l'ordre d'idées que nous venons de développer. — Quand le zinc *pur solide* se dissout dans l'acide sulfurique, il y a une certaine quantité de chaleur employée à opérer la *liquéfaction* du métal, et complétement *perdue* pour l'intensité de la force électromotrice. — Au contraire, avec le zinc *amalgamé*, le métal est déjà *liquéfié* par sa combinaison avec le mercure, et n'a pas besoin de *changer d'état* ou d'*absorber* de la chaleur pour s'unir à l'acide sulfurique. — La dissolution du *zinc amalgamé* dans l'acide sulfurique doit donc donner plus de chaleur et, par suite, une force électromotrice plus intense que la dissolution du zinc *pur*.

Cette manière de voir est confirmée par les résultats des recherches thermo-chimiques de M. Favre. Il résulte, en effet, de ses déterminations que la dissolution du *zinc amalgamé* dans l'acide sulfurique produit 18796 calories, tandis que la dissolution du zinc *pur* n'en produit que 18444. L'excès en faveur du *zinc amalgamé* est donc de $18796 - 18444 = 352$ unités de chaleur.

(1) *Recherches sur les forces électromotrices*. Paris, 1855, p. 45, 51.

Cependant, si l'amalgamation du zinc, en ramenant le métal à l'état liquide, favorise le développement de chaleur, il faut considérer que ce zinc amalgamé, pour s'unir à l'acide sulfurique, doit se séparer du mercure. Or, quelque faible qu'on la suppose, cette combinaison du zinc et du mercure exige une certaine quantité de chaleur pour être détruite. Par conséquent, les 352 calories trouvées en faveur du *zinc amalgamé* ne traduisent, comme le fait observer M. J. Regnauld, que la *différence* de ces deux actions de sens inverses. Si donc la dissolution du *zinc amalgamé* dégage plus de chaleur et fournit une force électromotrice plus intense que la dissolution du zinc pur, c'est uniquement parce que la liquéfaction du zinc *absorbe* plus de chaleur que n'en dégage son *amalgamation ordinaire*.

Du moment que l'effet produit par l'amalgamation du métal *positif* du couple est la résultante de deux forces de signes contraires, il est facile de comprendre comment M. Gaugain (1), en opérant sur des métaux *amalgamés* de nature différente et sur des amalgames du même métal contenant des proportions différentes de mercure, a trouvé que : « l'amalgamation peut avoir pour résultat » d'augmenter, de diminuer ou de ne pas modifier du » tout la force électromotrice du couple dont les métaux » amalgamés font partie. » En effet, suivant les valeurs relatives des deux forces de signes contraires mises en jeu, leur résultante, qui *seule* commande l'effet final, peut être positive, négative ou nulle.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1856, t. XLII, p. 430.

Influence du milieu ambiant sur l'échauffement des fils métalliques traversés par un courant voltaïque. — On doit à Davy des expériences très intéressantes sur l'échauffement des fils métalliques traversés par les courants électriques. Dans un circuit voltaïque, on place un fil de platine très fin, et un appareil destiné à mesurer l'intensité du courant. Le fil exposé à l'air libre s'échauffe et rougit; si alors on le plonge dans l'eau ou dans un liquide quelconque qui le refroidisse, le fil cesse d'être rouge, et, à mesure que sa température s'abaisse, l'intensité du courant augmente. L'explication de ce résultat se présente d'elle-même: nous savons, en effet, que la résistance des fils métalliques est d'autant plus faible que leur température est plus basse.

Prenons un fil de platine *rougi* par le passage d'un courant voltaïque, et refroidissons une portion du fil en appliquant dessus un morceau de glace ; immédiatement les portions qui ne sont pas en contact avec la glace prennent une température plus élevée, passent au *rouge blanc*, et peuvent même être fondues si le fil a été refroidi dans une grande étendue. Ce phénomène, fort singulier au premier abord, tient à ce que la résistance du circuit est diminuée, et par suite l'intensité du courant augmentée par le refroidissement d'une portion du fil. Dès lors les parties du fil non refroidies, étant traversées par un courant plus intense, doivent s'échauffer davantage.

Le travail de M. Harris (1) sur les effets de la décharge contient une expérience très intéressante. L'électricité

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1838, t. XVII, p. 175.

était transmise par un fil de fer très fin, tendu dans un vase de verre qui permettait de faire le vide autour du fil. — L'air étant fortement raréfié, on pouvait décharger une forte batterie à travers ce fil sans l'échauffer assez pour le rendre lumineux ; ce fil se détachait *en noir* dans l'axe d'une auréole de lumière qui l'enveloppait dans toute son étendue. — Lorsque l'air de l'intérieur du vase reprenait sa tension ordinaire, la décharge d'une batterie, dont la surface n'était pas le *cinquième* de celle de la précédente, suffisait pour *rougir* et *fondre* le fil. — Dans le premier cas, la résistance de l'air raréfié était moindre que celle du fil métallique, la majeure partie de la décharge passait à travers le gaz sous forme de gerbe lumineuse, et, par suite, la quantité d'électricité transmise par le fil et la quantité de chaleur développée étaient faibles. Mais, quand l'air était à la pression ordinaire, l'échauffement du fil était considérable, parce que la résistance du gaz ambiant forçait la décharge tout entière à traverser le fil métallique.

M. Grove (1) a publié une étude très complète de l'influence des gaz environnants sur le degré d'échauffement que prennent les fils métalliques traversés par les courants voltaïques. A et B (Fig. 414) sont deux tubes de verre; dans chacun d'eux est placée une spirale de platine; ces spirales sont formées avec deux échantillons de même longueur d'un fil très fin. Les deux tubes sont bien exactement fermés avec des bouchons de liége ; A est rempli d'oxygène, et B d'hydrogène. Des fils de

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1849, t. XII, p. 265.

cuivre servent à mettre les spirales en communication l'une avec l'autre et avec les pôles d'une pile. Les tubes A et B sont plongés dans des quantités égales d'eau prises à la même température. Quand le circuit fut fermé, le fil

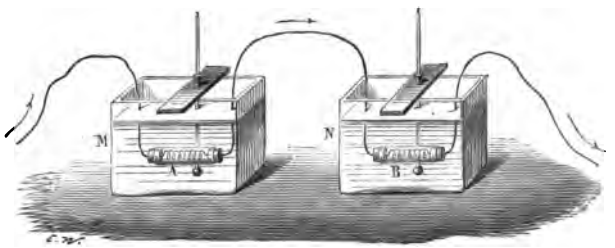


Fig. 414.

du tube A entouré d'oxygène devint *rouge blanc*, tandis que le fil entouré d'hydrogène dans le tube B ne s'échauffa pas d'une *manière visible*. Au bout de cinq minutes, M. Grove rompit le circuit : il trouva alors que la température de l'eau du vase N, dans laquelle plongeait le tube B plein d'hydrogène, ne s'était élevée que de 5°,56, tandis que celle de l'eau du vase M, dans laquelle plongeait le tube A plein d'oxygène, s'était élevée de 11°,63. M. Clausius (1) a donné la véritable explication de ce phénomène, qu'il considère comme un effet de la propriété dont jouit l'hydrogène d'avoir un *pouvoir refroidissant* supérieur à celui de l'oxygène. « En effet, dit-il, le gaz qui refroi- » dit le plus le fil de platine, le rend par là même plus » conducteur, et, en affaiblissant ainsi la résistance qu'il

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1853, t. XXII, p. 269.

» oppose à la transmission du courant, diminue en même » temps la chaleur développée par cette transmission, » quantité qui dépend elle-même du degré de résistance » présenté par le fil. Par contre, le fil placé dans le gaz » doué d'un pouvoir refroidissant moindre doit s'échauffer » davantage, puisque la résistance augmente par le seul » fait que sa température peut demeurer plus élevée. » Cette explication, dont l'exactitude a été mise hors de toute contestation possible par les expériences de M. Viard (1), s'applique également à tous les résultats du même genre observés par M. Grove dans des milieux gazeux autres que l'hydrogène et l'oxygène.

Phénomènes calorifiques déterminés par le passage des courants électriques à travers les soudures des circuits métalliques. — Dans son travail sur les élévations de température déterminées dans les fils métalliques par le passage des courants électriques (2), Peltier signala un fait très inattendu et qui attira vivement l'attention des physiciens. Il constata que, dans un circuit composé de fils métalliques hétérogènes soudés bout à bout, l'élévation de température acquise par chaque soudure dépend du sens dans lequel le courant la traverse. Les propriétés thermo-électriques des métaux permettent de résumer dans une règle générale très simple les faits observés par Peltier.

Dans une chaîne composée de fils métalliques hétérogènes soudés bout à bout, appelons sens *direct*, pour une

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1854, t. XXXIX, p. 904.
(2) *Ann. de chimie et de phys.*, 2e série, 1834, t. LVI, p. 371.

soudure quelconque, le sens dans lequel la traverserait le courant thermo-électrique développé dans la chaîne par l'échauffement de cette soudure *toute seule*. Nous pouvons dire alors que :

Lorsque la soudure qui réunit deux fils métalliques hétérogènes est traversée par un courant *direct*, elle s'échauffe moins que si le courant est *inverse*.

Ainsi, dans une chaîne KF (Fig. 415), composée d'un fil de cuivre C soudé à deux fils de platine P, P, si le cou-

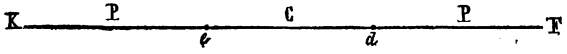


Fig. 415.

rant marche de K en F, la soudure *e* s'échauffe *moins* que la soudure *d* ; si, au contraire, le courant marche de F en K, la soudure *d* s'échauffe *moins* que la soudure *e*.

D'ailleurs, en dehors des soudures, l'élévation de température des fils métalliques suit les lois que nous avons exposées plus haut.

Peltier vit encore qu'avec certains métaux, le passage d'un courant *direct* à travers la soudure de jonction a pour effet de déterminer un *véritable refroidissement* de la soudure traversée, tandis que le passage d'un courant *inverse* élève sa température.

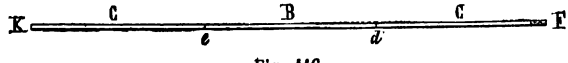


Fig. 416.

Ainsi, dans une chaîne KF (Fig. 416) composée d'un barreau de bismuth B soudé par les deux bouts à deux barreaux de cuivre C, C, un courant dirigé de K en F

échauffe la soudure *e* et *refroidit* la soudure *d*; au contraire, un courant dirigé de F en K détermine une *élévation de température* en *d* et un *refroidissement* en *e*.

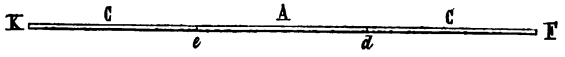


Fig. 417.

Avec un barreau d'antimoine A soudé à deux barreaux de cuivre C, C (Fig. 417), les résultats sont un peu moins prononcés, mais de même ordre. Un courant dirigé de K en F *refroidit* la soudure *e* et *échauffe* la soudure *d*; avec un courant dirigé de F en K, les effets sont inverses.

Avec un système semblable composé de platine et de fer ou même de cuivre et de fer, les effets sont encore plus faibles; cependant le passage du courant détermine aussi un *refroidissement* dans la soudure quand il la traverse du platine ou du cuivre au fer, et une *élévation de température* quand il est dirigé en sens inverse, c'est-à-dire du fer au platine ou au cuivre.

Mais c'est dans une chaîne métallique composée de barreaux de bismuth et d'antimoine que ces effets acquièrent leur *maximum* d'intensité. Toutes les soudures traversées par un courant *direct*, c'est-à-dire dirigé du bismuth à l'antimoine, sont *refroidies;* la température s'*élève*, au contraire, dans toutes les soudures traversées par un courant *inverse*, c'est-à-dire dirigé de l'antimoine au bismuth.

Le refroidissement de la soudure de jonction d'un barreau de bismuth et d'antimoine peut être rendu évident

par une expérience très simple. On pratique une petite excavation dans le métal au niveau de la soudure, on abaisse à *zéro* la température des deux barreaux, et l'on verse une goutte d'eau dans l'excavation : au moment où la soudure est traversée par un courant *direct*, l'eau est *congelée*.

Pour constater ces faits, Peltier avait d'abord employé la pince thermo-électrique décrite tome Ier, page 463; mais, dans le but de répondre à des objections qui attribuaient les effets obtenus au développement de courants induits dans le thermoscope métallique, il se servit d'un thermomètre à air. La soudure observée était placée dans le centre du réservoir dont les parois étaient traversées par les fils métalliques.

Il résulte des travaux de Peltier que, pour obtenir ces effets de *refroidissement* des soudures de jonction, même avec des barreaux de bismuth et d'antimoine, il faut employer des courants de très faible intensité. Avec des courants un peu forts, on observe bien toujours un *moindre échauffement* des soudures traversées par le courant *direct*, mais les barreaux métalliques s'échauffent trop eux-mêmes, et cèdent trop de chaleur aux soudures par voie de conductibilité, pour leur permettre de tomber au-dessous de leur température initiale.

Dans ces dernières années, M. Adie (1) a nié ce *refroidissement* des soudures de jonction du bismuth et de l'antimoine, et a essayé de montrer que, dans tous les cas possibles, on n'observe qu'un *moindre échauffement*

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1852, t. XXI, p. 57.

quand le courant est *direct*. M. Tyndall (1) a repris cette étude, et a démontré, dans une série d'expériences irréprochables et très variées, l'exactitude du fait observé par Peltier.

Lorsqu'on fait passer un courant voltaïque à travers une pile thermo-électrique, les soudures de jonction sont alternativement traversées dans le sens *direct* et dans le sens *inverse;* deux soudures successives prennent, par conséquent, des températures différentes. Si donc, après avoir interrompu le courant voltaïque, on met cette pile en communication avec un galvanomètre, l'inégal échauffement des soudures successives doit déterminer l'apparition d'un courant thermo-électrique *inverse* de celui qui a été primitivement dirigé à travers la pile. Le sens et l'intensité de ce courant thermo-électrique peuvent servir à déterminer le sens et la grandeur de la différence de température des soudures. Tel est le principe de la méthode expérimentale employée par M. Quintus Icilius (2) pour déterminer les lois des phénomènes découverts par Peltier. Ses recherches établissent que l'intensité du courant fourni par la pile thermo-électrique après l'interruption du courant voltaïque, est proportionnelle à l'intensité de ce dernier courant. Il est donc démontré que :

Un courant voltaïque qui traverse une pile thermo-électrique établit entre les soudures paires et impaires une différence de température qui est *proportionnelle à sa propre intensité*.

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1852, t. XXI, p. 317.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1853, t. XXXIX, p. 249.

Mais nous savons, d'autre part, que l'élévation de température déterminée par le passage du courant voltaïque dans les portions des barreaux qui ne sont pas voisines des soudures varie proportionnellement *au carré de l'intensité du courant*. Du rapprochement de ces deux lois différentes, M. Quintus Icilius conclut, avec raison, que l'influence de l'inégal échauffement des soudures doit devenir de moins en moins sensible, à mesure que l'intensité du courant voltaïque dirigé à travers la pile thermo-électrique augmente. On comprend ainsi pourquoi Peltier et Möser n'ont pu observer un *refroidissement* des soudures qu'en opérant avec des courants d'une très faible intensité.

Effets calorifiques observés dans l'arc voltaïque. — Pour compléter cette exposition des effets calorifiques qui accompagnent le passage d'un courant électrique, nous aurions à parler des phénomènes observés dans l'*arc voltaïque*. Nous traiterons ce sujet avec détail dans l'article suivant, en traçant l'histoire des propriétés de cet *arc voltaïque*.

ARTICLE TROISIÈME.

EFFETS LUMINEUX.

Quelle que soit son origine, le flux d'électricité, lorsqu'il traverse des milieux mauvais conducteurs, peut produire sur son passage des phénomènes lumineux dont la forme, l'éclat, la couleur, etc., varient avec les circonstances au milieu desquelles s'opère la transmission. Nous

commencerons par la description des effets lumineux déterminés par les décharges d'électricité statique, les courants d'induction et les courants voltaïques; nous nous occuperons ensuite des lois de l'intensité, et de la composition de la lumière électrique.

§ Ier. — Effets lumineux des décharges d'électricité statique.

Le cabinet de physique de la Faculté de médecine possède une machine électrique très puissante (1); nous en avons profité pour étudier avec soin les effets lumineux dont la décharge s'accompagne, soit à l'air libre, soit dans l'air raréfié. Des figures nombreuses et dessinées d'après nature représentent les principales formes du phénomène, et permettent de suivre les transformations qu'il éprouve quand on fait varier la distance explosive et la densité du milieu gazeux.

Dans les gaz et à la pression ordinaire, les phénomènes lumineux qui accompagnent les décharges d'électricité statique peuvent se présenter sous trois formes principales, l'*étincelle*, l'*aigrette* et la *lueur*.

Étincelle. — On obtient de belles étincelles en présentant aux extrémités des conducteurs de la machine la

(1) Le plateau de verre de cette machine a 1m,32 de diamètre. Les coussins frotteurs, établis par M. Perrault dit Steiner, de Francfort-sur-le-Mein, étaient enduits d'un amalgame composé de mercure, de zinc, d'étain et d'une faible proportion de bismuth. La substitution des coussins frotteurs et de l'excellent amalgame de M. Steiner aux coussins ordinaires et à l'or mussif augmente considérablement la puissance des machines.

tranche d'un large plateau métallique en communication avec les coussins frotteurs, et tenu par un manche isolant.

A *deux* centimètres de distance (Fig. 418), le conducteur de la machine et le plateau échangent une série de décharges lumineuses accompagnées d'un bruit continu

Fig. 418.

Fig. 419.

et très ressemblant à celui que rend une pièce de soie qu'on déchire. Ces décharges se succèdent avec tant de rapidité, que l'œil ne peut pas les séparer. Dans ces circonstances, la machine et le plateau semblent réunis par un large trait de feu *continu*, rectiligne, de même épaisseur dans toute son étendue, blanc et d'un éclat éblouissant.

Jusqu'à *huit* centimètres environ (Fig. 419), le phénomène conserve les mêmes apparences; seulement, à mesure que la distance du conducteur et du plateau augmente, le trait de feu s'amincit surtout dans sa partie médiane, tout en conservant beaucoup d'éclat vers ses deux extrémités. Bien que l'œil ne puisse pas encore

séparer les décharges, cependant le bruit qui les accompagne annonce que leur fréquence diminue à mesure que le plateau s'éloigne.

A partir de *dix* centimètres de distance environ, les phénomènes perdent cette apparence de continuité. Les décharges sont manifestement distinctes, chacune d'elles est accompagnée d'un craquement sec, et de l'apparition d'un trait de feu très brillant, d'un sillon de lumière très resserré, composé d'une succession de lignes droites disposées en *zigzag*. Les Figures 420, 421, représentent les étincelles fournies à *quinze* et à *vingt-cinq* centimètres de distance. Par un temps sec, lorsque la machine est en pleine activité, on peut facilement obtenir de belles étincelles en *zigzag* de *trente-cinq* centimètres de longueur. Les décharges sont d'ailleurs d'autant moins fréquentes

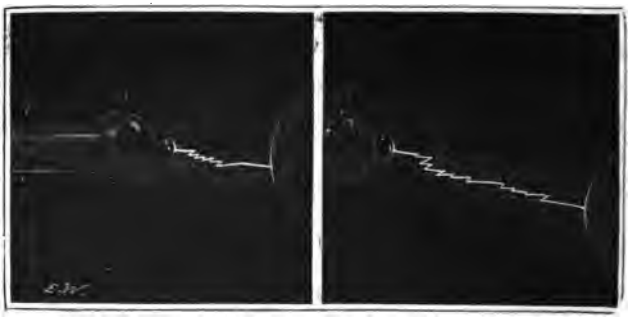


Fig. 420. Fig. 421.

que la distance du conducteur et du plateau est plus grande.

Les phénomènes lumineux qui accompagnent la dé-

charge électrique acquièrent un développement et un éclat très remarquables, lorsque (Fig. 422) le disque métallique, restant en communication avec les coussins frotteurs, est appliqué par sa tranche contre le plateau de verre de la machine et au-dessous de la mâchoire de l'un des conducteurs. Dans ce cas, la machine se décharge sur le disque, le flux d'électricité serpente sur la surface du plateau de verre, et y dessine des arcs lumineux d'un très grand éclat. Si l'atmosphère n'est pas trop chargée d'humidité et si l'amalgame a été récemment renouvelé sur les coussins frotteurs, on obtient ainsi des bandes lumineuses de plusieurs millimètres de largeur, blanches, d'un éclat éblouissant, et qui occupent sur le plateau de verre des arcs de *soixante* degrés. Avec la grande machine de la Faculté de médecine, ces étincelles circulaires peuvent facilement

Fig. 422.

atteindre une longueur de *soixante-cinq* centimètres environ.

A la pression ordinaire et dans l'air, les longues étincelles sont très brillantes ; leur couleur est bleuâtre, tintée de pourpre aux extrémités. Quand la distance explosive est très grande, ou quand la quantité d'électricité qui passe n'est pas très considérable, l'étincelle est moins éclatante dans ses portions médianes qu'à son point de départ et à son point d'arrivée.

La nature des gaz traversés par la décharge exerce une grande influence sur la couleur et la vivacité de l'étincelle. Nous empruntons les résultats suivants au travail de M. Faraday (1). — Dans l'azote, l'étincelle est très belle ; elle revêt les mêmes apparences que dans l'air, mais elle est plus sonore, et sa teinte est plus décidément bleuâtre ou pourprée. — Dans l'oxygène, l'étincelle est plus blanche et un peu moins brillante que dans l'air. — Dans l'hydrogène, l'étincelle est peu sonore et remarquable par sa couleur cramoisie. Cette teinte particulière s'efface et disparaît quand le gaz est raréfié. D'après Van Marum, l'étincelle serait *quatre* fois plus longue dans l'hydrogène que dans l'air. — Dans l'acide carbonique, l'étincelle peut, dans des circonstances identiques, être obtenue plus longue que dans l'air ; sa couleur ne diffère de celle de l'étincelle dans l'air que par une légère teinte verte. — Dans le gaz chlorhydrique bien sec, l'étincelle est presque blanche, d'un éclat uniforme dans toute sa longueur. — — Dans le gaz de l'éclairage, l'étincelle est tantôt verte,

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 452.

tantôt rouge; quelquefois elle se partage en deux portions, l'une verte et l'autre rouge.

L'étincelle électrique peut aussi se produire dans les liquides mauvais conducteurs, tels que l'huile de térébenthine, l'huile d'olive, etc. On l'obtient plus difficilement dans l'eau. La décharge électrique, lorsqu'elle traverse les solides mauvais conducteurs, tels que la résine, le blanc de baleine, le verre, etc., produit sur son trajet une véritable étincelle.

Les expériences nombreuses de Nairne et Van Marum prouvent que l'étincelle produit sur son passage une élévation de température. Les propriétés calorifiques de l'étincelle sont rendues évidentes par l'expérience du pistolet de Volta, et l'inflammation de l'éther déterminée par une décharge qui vient frapper, près de sa surface, les parois du vase métallique dans lequel il est contenu. Ajoutons encore que la mèche d'une lampe à alcool récemment éteinte se rallume quand elle est traversée par de fortes étincelles, et que le coton-poudre prend feu quand on le place sur le trajet des nombreuses et volumineuses étincelles échangées à courte distance par le conducteur de la machine et une sphère métallique en communication avec le sol. — Cependant M. Ed. Becquerel (1) n'a pu constater aucune trace appréciable de variation de température sur la surface noircie d'une pile thermo-électrique exposée à la radiation de l'étincelle. De plus, certains corps très combustibles, comme le papier, la poudre à canon, etc., mais qui, pour prendre feu, ont besoin de rester

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1839, t. VIII, p. 334.

pendant un certain temps soumis à l'action de la chaleur, ne s'enflamment pas quand ils sont frappés par les étincelles de la machine ou d'une batterie électrique.

Ces faits négatifs ne sont pas de nature à faire douter des propriétés calorifiques de l'étincelle, et trouvent leur explication naturelle dans l'*instantanéité* de la décharge électrique. L'exactitude de cette manière de voir est démontrée par l'expérience suivante citée par M. de La Rive (1). Pour enflammer la poudre, il suffit de ralentir la marche de l'électricité, et d'augmenter la durée de l'étincelle; on y parvient facilement, en forçant la décharge d'une bouteille de Leyde à traverser une corde humide ou un tube de verre rempli d'un liquide capable d'opposer une forte résistance à son passage.

C'est ici le lieu de signaler une forme particulière que prend le phénomène lumineux quand la décharge s'opère à très grande distance, à *trente* centimètres, par exemple. L'étincelle (Fig. 423) consiste, comme à l'ordinaire, en un trait de feu très brillant; mais, en outre, chaque élément rectiligne de ce trait de feu central fournit latéralement une ou plusieurs ramifications lumineuses, très déliées, de longueur variable, et qui ne tardent pas à s'éteindre dans la masse d'air environnante. Ces ramifications sont évidemment autant de décharges latérales fournies par l'étincelle elle-même; elles accusent l'existence d'une tension latérale dans le flux d'électricité fourni par la machine. — Quand la distance explosive est faible, la résistance des couches d'air interposées n'est pas assez considérable

(1) *Traité d'électricité théorique et pratique*, t. II, p. 219.

pour que la tension latérale se révèle par des phénomènes sensibles, l'électricité passe tout entière dans la même

Fig. 423.

direction, l'étincelle est simple et ses bords sont nettement dessinés. — Mais lorsque, par le fait de l'augmentation de la distance explosive, la résistance à vaincre devient très grande, une partie de l'électricité obéit à la tension laté-

Fig. 424.

rale ; alors apparaissent ces fines traînées lumineuses, véritables décharges de *dérivation*, qui émanent toutes du

flux principal, et tendent à décomposer l'étincelle en un nombre variable de ramifications lumineuses.

Vers les limites extrêmes de la distance explosive, il arrive souvent que l'étincelle (Fig. 424) obéit à un mouvement de dissociation. Le conducteur de la machine et le plateau sont encore réunis par un sillon lumineux en *zigzag;* mais ce trait de feu, pâle et grêle, fournit une multitude de ramifications latérales, longues et divergentes. Cette forme du phénomène lumineux et la précédente marquent le passage de la véritable étincelle à l'aigrette électrique.

Aigrette. — Lorsque la machine est mise en activité dans une chambre obscure, des jets lumineux, connus sous le nom d'aigrettes, s'échappent spontanément des portions les plus saillantes des conducteurs, surtout de celles dont les dimensions sont petites et dont la tension est conséquemment très considérable. Chaque aigrette tient au conducteur par un pédicule cylindrique ou légèrement conique, de longueur variable et d'une couleur violacée teintée de pourpre. Au sommet du pédicule, le jet lumineux se divise en un nombre variable de ramifications divergentes, pâles, agitées d'une sorte de frémissement, et accompagnées d'un son bas, sourd et saccadé. L'aigrette n'est évidemment qu'une décharge d'une pièce de la machine vers les murailles de la chambre, ou vers les conducteurs situés à grande distance. L'électricité s'élance par un jet unique qui constitue le pédicule; puis, à cause de la grande résistance qu'elle rencontre, elle se partage en une multitude de décharges latérales traduites par des ramifications lumineuses, divergentes, qui se sub-

divisent à leur tour. A mesure que l'électricité émise par la machine envahit des espaces de plus en plus étendus, le phénomène lumineux perd graduellement de son éclat, et finit par disparaître complétement.

Il est facile de déterminer la production de très belles aigrettes, en approchant du conducteur de la machine, et en maintenant un peu au delà de la distance explosive des disques ou des sphères métalliques en communication avec les coussins frotteurs.

La Figure 425 représente une des formes de l'aigrette qui s'échappait du conducteur de la machine, quand la tranche du plateau métallique était maintenue à environ *trente-cinq* centimètres de distance. Le pédicule, de forme rectiligne, avait une belle couleur violacée teintée de pourpre; la gerbe était composée de jets lumineux, divergents, blancs, dont l'éclat allait s'affaiblissant du centre

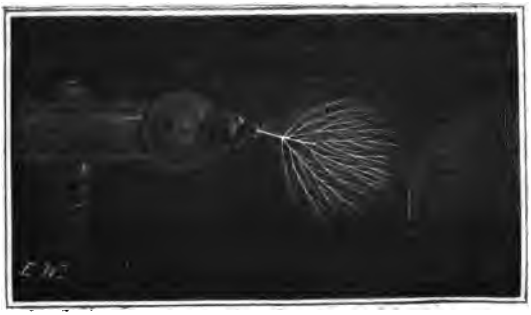


Fig. 425.

à la périphérie. Le bord du disque était légèrement phosphorescent; le sommet de l'aigrette était séparé du disque par un espace complétement obscur.

La Figure 426 indique une autre forme de cette aigrette. Rien n'était changé dans la disposition générale du phénomène; seulement un faisceau de rayons blanchâtres s'échappait des bords du disque, et venait joindre le sommet de l'aigrette de la machine.

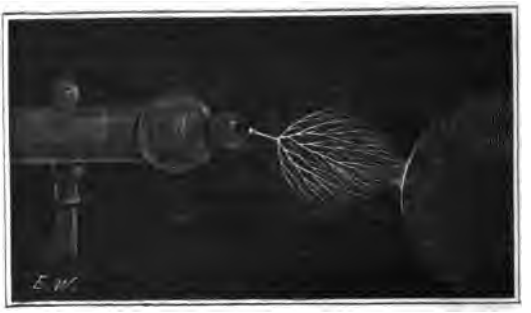


Fig. 426.

En maintenant la face du plateau métallique à *vingt* centimètres d'un bouton métallique en forme de goutte de suif de *cinq* à *six* millimètres de diamètre, on obtenait une très belle aigrette (Fig. 427). Le pédicule, d'une belle couleur pourpre, était surmonté d'une houppe de forme très régulière, constituée par une quantité innombrable de fines ramifications lumineuses. Cette aigrette, y compris le pédicule, s'étendait à *dix* centimètres environ du bouton du conducteur de la machine.

Du reste, en faisant varier la forme, la distance et la position du corps métallique présenté au conducteur de la machine, on peut modifier à l'infini la forme, la disposition, l'étendue et l'éclat de ces aigrettes.

Les apparences lumineuses porteraient à penser que

l'aigrette est le résultat d'un écoulement continu d'électricité. M. Wheatstone a analysé le phénomène au moyen de son miroir tournant; ses recherches démontrent que ce

Fig. 437.

jet lumineux est produit par des décharges successives, intermittentes, et séparées par un intervalle de temps appréciable. Le son qui accompagne l'aigrette est dû lui-

même à la répétition du craquement produit par chacune de ces décharges. Cette constitution de l'aigrette peut être vérifiée d'une manière très simple. La tête étant maintenue immobile, on imprime à l'œil des mouvements rapides, et tels que son axe traverse la direction du jet lumineux; chaque décharge partielle vient alors se peindre sur une portion distincte de la rétine, et la gerbe lumineuse se résout en un certain nombre d'aigrettes élémentaires, toutes de mêmes dimensions, toutes composées d'un pédicule et d'une partie évasée et rameuse. Cette succession rapide de décharges est un effet de l'éloignement des corps conducteurs environnants sur lesquels s'exerce l'influence de la machine. Chacune de ces décharges est incomplète, n'entraîne qu'une partie de l'électricité accumulée, laisse un résidu considérable sur la machine, qui très rapidement reprend sa tension première et fournit une nouvelle aigrette élémentaire.

Avec des conducteurs terminés par des extrémités sphériques de divers diamètres, M. Faraday (1) a obtenu les résultats suivants : — A mesure que le diamètre de ces sphères diminue, le jet lumineux perd de son étendue, les décharges partielles se succèdent avec plus de rapidité, le son rendu s'affaiblit et prend une tonalité plus élevée. L'aigrette qui s'échappe de l'extrémité arrondie d'un fil métallique est très petite, mais toujours décomposable; elle s'accompagne d'un son très faible et très aigu, représentant une note musicale distincte. Ces faits sont complétement d'accord avec ce que nous avons dit plus haut

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 453.

de la constitution et du mécanisme de formation des aigrettes.

A la pression ordinaire, la nature des gaz traversés par la décharge exerce une grande influence sur la couleur, la forme et la facilité de production de l'aigrette. Ce sujet a été étudié avec beaucoup de soin par M. Faraday (1).

Dans l'air, on obtient facilement des aigrettes bien dessinées, remarquables par leur développement, et d'une belle teinte purpurine. — Dans l'oxygène, l'aigrette est étroite, comprimée, blanchâtre et de peu d'éclat. — Dans l'hydrogène, l'aigrette prend plus de développement et d'éclat que dans l'oxygène; sa couleur est gris verdâtre. — Dans le gaz de l'éclairage, l'aigrette se produit difficilement, elle est courte et composée de ramifications très serrées. Elle se rapproche beaucoup de l'étincelle; sa couleur est généralement verdâtre. — Dans le gaz acide carbonique, la décharge a une grande tendance à se faire sous forme d'étincelle. L'aigrette a peu de développement et manque d'éclat. — Dans le gaz chlorhydrique, l'aigrette est très difficile à obtenir; elle est courte et sans éclat. A *deux* centimètres de distance, la décharge s'opère habituellement entre les extrémités arrondies des conducteurs en présence, sans produire de phénomène lumineux appréciable. — Dans l'azote, les aigrettes ont plus d'étendue, plus d'éclat, et se produisent avec plus de facilité que dans les autres gaz.

M. Faraday a obtenu aussi des aigrettes dans l'huile de térébenthine. Le liquide étant contenu dans un vase mé-

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 465.

tallique, il y plongeait le bout arrondi d'un fil métallique tenu par un manche isolant. Cette aigrette, fort difficile à produire, très petite, composée de ramifications simples et très divergentes, ne pouvait être observée que dans l'obscurité complète.

Ce que nous avons dit jusqu'ici s'applique spécialement aux aigrettes qui émanent des surfaces chargées d'électricité *positive*. En général, les conducteurs de petites dimensions, quand ils sont chargés d'électricité *négative*, présentent à leurs extrémités arrondies un point brillant, une espèce d'*étoile;* cependant le conducteur *négatif* de la machine de Nairne peut aussi fournir de véritables aigrettes dont M. Faraday a fait une étude très détaillée. Il résulte de ses observations que, toutes choses égales d'ailleurs, l'aigrette *négative* est moins développée et moins brillante que la *positive*. La tonalité du son rendu et la décomposition du jet lumineux à l'aide du miroir tournant s'accordent pour montrer que les décharges élémentaires de l'aigrette *négative* se succèdent avec une rapidité *sept* ou *huit* fois plus considérable que celles de l'aigrette *positive*. Ces différences indiquent qu'un corps électrisé *négativement* se conduit comme un corps *positif* dont la décharge s'effectue à une moindre tension. Le phénomène de l'aigrette vient donc confirmer l'exactitude d'une observation dont nous avons déjà parlé. Nous avons vu, en effet (vol. Ier, page 201), que de deux surfaces semblables, également conductrices et placées dans l'air, la *négative* se décharge toujours à une tension plus basse que la *positive*.

De l'extrémité du conducteur *négatif* de la machine de

Nairne (Fig. 428) rapprochons une tige mince de cuivre, en communication avec le sol et terminée par une sphère de *deux* à *trois* millimètres de diamètre. A la distance de *huit* centimètres environ, le phénomène lumineux prend une très belle apparence. De la sphère rendue *positive* par influence part une très belle aigrette *positive*, avec sa forme évasée ordinaire; le conducteur *négatif* fournit

Fig. 428.

une aigrette *négative* allongée, contractée sur elle-même. Ces deux aigrettes restent distinctes l'une de l'autre, et séparées par un intervalle complétement obscur.

La supériorité de volume et d'éclat de l'aigrette *positive* sur la *négative* est très prononcée dans l'air et dans l'azote. Mais, dans l'hydrogène, et surtout dans l'acide carbonique, le gaz de l'éclairage, l'oxygène et le gaz chlorhydrique, l'aigrette *négative* reste sensiblement la même, tandis que

la *positive* s'affaiblit, et perd de son étendue et de son éclat. Il en résulte que, dans ces derniers milieux gazeux, ces deux espèces d'aigrettes se rapprochent beaucoup l'une de l'autre par leurs caractères extérieurs, et que souvent il est très difficile et même impossible de les distinguer.

Si le milieu dans lequel elle se produit modifie profondément l'aigrette électrique, il n'en est pas de même des corps qui fournissent la décharge. On peut indifféremment employer des métaux, du bois, du carton, du charbon, etc., l'aigrette conserve toujours les mêmes caractères. L'influence du corps qui fournit l'électricité se borne à rendre la succession des décharges élémentaires plus ou moins rapide, selon son degré plus ou moins élevé de conductibilité.

Lueur. — Quand la machine électrique est en activité, il se montre souvent aux extrémités des conducteurs une *lueur* d'un éclat et d'une étendue variables, tranquille, continue, et qui ne s'accompagne d'aucun bruit. Ce phénomène lumineux est produit par un mouvement rapide et continu de diffusion qui emporte, à travers les couches gazeuses immédiatement en contact avec les conducteurs, l'électricité accumulée à haute tension sur la machine. La lueur s'accompagne ordinairement d'un courant d'air dont le point de départ est la partie lumineuse. M. Faraday, qui a fait une étude détaillée de cette forme de la décharge (1), dit que quelquefois ce courant d'air est dirigé vers la lueur; il pense que, dans ce cas, ce sont

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 486.

les couches d'air environnantes qui cèdent leur électricité au conducteur.

A l'air libre avec une sphère de 7 à 8 millimètres de diamètre, on obtient habituellement une aigrette, la lueur ne se produit qu'exceptionnellement. — Quand le diamètre de la sphère n'est plus que de 5 millimètres, la lueur est plus facilement obtenue. — Avec des sphères plus petites, et surtout avec des conducteurs terminés en pointe, l'aigrette ne se montre plus et se trouve constamment remplacée par une lueur. Il suffit donc de diminuer l'étendue de la surface qui fournit la décharge pour favoriser la transformation de l'étincelle en aigrette, et de l'aigrette, en lueur continue.

La production de la lueur est d'autant plus facile, que la machine est plus puissante, et que l'atmosphère gazeuse ambiante est plus raréfiée. — Ainsi, il suffit d'activer le mouvement de rotation du plateau de la machine pour qu'une aigrette fournie par une sphère de petit diamètre disparaisse et soit remplacée par une simple lueur continue. — Dans une masse d'air convenablement raréfiée et avec une sphère de *six* centimètres de diamètre, on peut obtenir une très belle *lueur* qui recouvre une partie de la surface de la sphère.

L'électricité *négative* produit beaucoup plus difficilement la lueur que l'électricité *positive*. A l'air libre, M. Faraday n'a pas pu obtenir la lueur *négative* sur des conducteurs de très petites dimensions, terminés par des surfaces arrondies. En présence de ces faits négatifs, il se demande si l'*étoile* qui se montre, à la pression ordinaire, sur une pointe *négative*, est une vraie lueur

continue, ou une petite aigrette intermittente. Mais, dans l'air raréfié, on obtient de très belles lueurs *négatives* avec des sphères de 5 millimètres de diamètre ; dans ce cas, la lueur enveloppe la sphère tout entière et une partie de la tige qui la supporte.

La lueur électrique se manifeste dans tous les gaz. M. Faraday dit avoir obtenu une lueur, mais très faible et très pâle, dans une masse d'huile de térébenthine.

Fig. 429.

Décharges dans les milieux gazeux très raréfiés. — Dans les expériences de ce genre on se sert habituellement

d'un vase de verre de forme elliptique, à deux tubulures, connu sous le nom d'*œuf électrique* (Fig. 429). — Sur la tubulure supérieure est mastiquée une garniture métallique munie d'une boîte à cuir, qui laisse passer à frottement dur une tige de cuivre dont les extrémités sont terminées à l'extérieur par un anneau, et à l'intérieur par une petite sphère. — Sur la tubulure inférieure est mastiquée une garniture métallique vissée sur un pied de bois. Cette garniture porte un robinet, et une tige de cuivre terminée par une petite sphère. — Quand on veut raréfier le gaz dans l'intérieur de l'appareil, on détache le pied, et l'on visse la garniture inférieure sur la machine pneumatique.

Mettons la garniture inférieure en communication avec le sol et avec les coussins frotteurs d'une bonne machine électrique, éloignons les boules intérieures à une distance de *quatorze* ou *quinze* centimètres, et rapprochons la garniture supérieure du conducteur de la machine jusqu'à ce que ces deux surfaces métalliques échangent une série d'étincelles.

Si l'air est à la pression ordinaire dans l'intérieur de l'œuf, chaque étincelle *extérieure* s'accompagne (Fig. 429) de l'apparition d'une étincelle *intérieure*, qui s'étend de la boule supérieure ou *positive* à la boule inférieure ou *négative*, et se présente d'ailleurs avec tous les caractères d'une étincelle de même longueur produite à l'air libre.

Cela posé, raréfions graduellement l'air contenu dans l'œuf électrique, et disposons l'expérience de la même manière. A mesure que la pression intérieure diminue, le phénomène lumineux déterminé par le passage de l'électricité à travers l'œuf se modifie et change d'apparence.

D'abord l'étincelle fournit des ramifications latérales ; puis elle se dissocie complétement, et se transforme en une véritable aigrette très évasée.

Quand la pression intérieure n'est plus que de *six* centimètres de mercure (Fig. 430), la boule supérieure ou *positive* fournit une multitude de bandes lumineuses pourprées.

Fig. 430.

Fig. 431.

De ces bandes, les unes se dirigent vers les parois de l'œuf, tandis que d'autres, au nombre de *quatre* ou *cinq*, traversent l'appareil dans toute son étendue; ces dernières sont d'abord divergentes, puis se rapprochent et viennent

aboutir à la boule inférieure ou *négative*. Cette boule inférieure et la tige qui la supporte sont enveloppées d'une couche épaisse de lumière violacée.

Quand la pression intérieure n'est plus que de *deux* millimètres, le flux d'électricité se réunit en une colonne fusiforme de lumière pourprée, qui s'étend de la boule supérieure ou *positive* à la boule inférieure ou *négative* (Fig. 431). Plus brillante vers ses extrémités, et surtout dans le voisinage de la boule supérieure que dans son milieu, cette gerbe lumineuse occupe environ le tiers de la cavité de l'œuf dans sa partie renflée. D'ailleurs, la boule inférieure et la tige qui la supporte continuent à être enveloppées d'une auréole épaisse de lumière violette.

Dans ces expériences, l'œuf peut être remplacé par le tube de verre de *trois* mètres de longueur dont on se sert pour montrer la chute des corps dans le vide. Chaque garniture est munie d'une tige terminée par une boule. L'une de ces garnitures communique avec les coussins, et l'autre est disposée de manière à recevoir les décharges du conducteur de la machine électrique. Lorsque l'air intérieur a été ramené à une pression de *deux* millimètres, le tube est traversé, dans toute sa longueur, par une colonne de lumière pouprée, qui le remplit complétement et prend le nom de *fleuve électrique*. D'ailleurs, dans ce cas comme avec l'œuf, la boule *négative* en communication avec les coussins est enveloppée, ainsi que la tige qui la supporte, d'une auréole de lumière violacée.

La Figure 432 représente une expérience analogue faite avec une cloche dans laquelle l'air est fortement raréfié.

L'extrémité intérieure de la tige qui passe à travers la garniture de la cloche porte une étoile métallique à cinq pointes. Sur le plateau de la machine pneumatique, on place un disque métallique de *huit* à *dix* centimètres de diamètre, en communication avec les pièces métalliques

Fig. 432.

de la machine pneumatique, et, par leur intermédiaire, avec les coussins frotteurs de la machine électrique. La distance de ce disque à l'étoile est de *dix-huit* à *vingt* centimètres. Les pointes de l'étoile deviennent fortement lumineuses ; de chacune d'elles s'élance un jet de lumière

pourprée qui vient aboutir au pourtour de la plaque négative. Ces bandes lumineuses, très étroites à leur origine, s'élargissent et perdent de leur éclat à mesure qu'elles se rapprochent de la plaque.

Il est facile de démontrer que ces flux d'électricité dirigés à travers les gaz raréfiés agissent par influence sur les corps voisins. Il suffit, en effet, de rapprocher un doigt des parois de la cloche, pour voir la bande lumineuse correspondante se dévier de sa direction, et se diriger vers le doigt.

L'éclat des gerbes lumineuses obtenues dans ces expériences est incomparablement moindre que celui de l'étincelle à l'air libre. Cet affaiblissement de la lumière électrique dans les gaz raréfiés tient évidemment à la diffusion du flux d'électricité qui, au lieu de rester condensé dans un sillon très étroit, s'étale en une grosse colonne ou en plusieurs bandes élargies. On obtient de très beaux effets lumineux, en faisant passer la décharge d'une forte batterie à travers l'œuf électrique épuisé de gaz par une bonne machine pneumatique. Dans ce dernier cas, il passe à la fois une grande quantité d'électricité, et la gerbe lumineuse prend beaucoup d'éclat.

On peut encore opérer avec un tube en siphon disposé de manière à former un double baromètre (Fig. 433). Le mercure d'une des cuvettes est mis en communication avec le sol ; dans le mercure de l'autre cuvette plonge une tige métallique terminée par une sphère. Quand cette sphère est rapprochée du conducteur de la machine en activité, une étincelle éclate entre cette sphère et le conducteur. L'électricité, pour passer d'une colonne mercurielle à

l'autre, et de là dans le sol, doit traverser la double chambre barométrique. Si l'on opère dans l'obscurité, chaque décharge s'accompagne d'une lueur verdâtre qui remplit l'espace vide. On peut aussi faire passer à travers cet appareil la décharge d'une bouteille de Leyde, ou d'une

Fig. 433.

batterie électrique. Dans ce cas, le flux d'électricité est plus abondant, et le phénomène lumineux a plus d'éclat.

Plaçons maintenant (Fig. 434) l'œuf de manière que sa garniture supérieure *touche* le conducteur de la machine électrique, mettons les deux boules intérieures en contact, et ramenons l'air intérieur à *deux* millimètres de pression. L'électricité de la machine s'écoule d'une manière continue à travers l'appareil. — Si nous soulevons la boule

supérieure ou *positive*, immédiatement la sphère inférieure et sa tige s'enveloppent d'une auréole de lumière violacée; en même temps la boule *positive* fournit une gerbe de lumière pourprée dirigée vers la boule *négative*, qui ne s'étend pas tout à fait jusqu'à l'auréole de lumière

Fig. 454.

violacée et en reste séparée par un espace complétement obscur. Quand on fait varier la distance des boules, la sphère *négative* et sa tige restent constamment enveloppées de leur auréole violette; la gerbe pourprée fournie par la sphère *positive* change de forme avec la distance des

deux boules, mais la gerbe et l'auréole restent *toujours* séparées par un intervalle complétement *obscur*. La Figure 434 représente le phénomène tel qu'il apparaît, quand les deux boules sont à *cinq* ou *six* centimètres l'une de l'autre.

Dans ces diverses expériences, et dans toutes les expériences analogues que l'on peut faire avec la pile voltaïque et les appareils d'induction, les parois des vases de verre prennent une teinte opaline particulière. Ce phénomène est dû, d'une part, à la *fluorescence* du verre, et, d'autre part, à l'excessive richesse de la lumière électrique en rayons *ultra-violets*.

Davy a étudié avec beaucoup de soin (1) les phénomènes lumineux qui accompagnent la transmission de l'électricité à travers des espaces remplis de vapeurs très différentes par leur nature et leur degré de tension. L'appareil expérimental était fort simple. — L'extrémité supérieure du tube de verre A (Fig. 435) était traversée par un gros fil de platine dont le bout intérieur était arrondi. La branche verticale du tube et une faible partie de la branche inclinée étaient remplies de mercure pur, bouilli et bien purgé d'air. Le tube était muni à son extrémité ouverte d'un robinet R, qui permettait de mettre l'appareil en communication avec une machine pneumatique. — Quand l'air était raréfié au-dessous du robinet, le mercure se détachait de l'extrémité fermée du tube ; on obtenait ainsi, autour du fil de platine D, une chambre B, dont on pouvait augmenter ou diminuer la capacité à volonté, com-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1822, t. XX, p. 168.

plétement vide d'air, et ne contenant que des vapeurs de mercure. — La communication s'établissait entre le robinet R et le mercure, au moyen d'un fil métallique préalablement placé dans la chambre C, ou seulement à travers l'air plus ou moins raréfié de cette chambre.

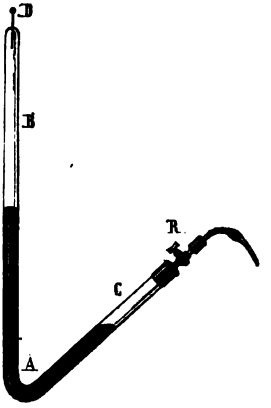


Fig. 435.

L'expérience peut être faite de deux manières : — Dans le premier cas, on fait communiquer la tige de platine D avec le sol, et l'on détermine une étincelle entre le robinet R et le conducteur d'une machine électrique en action. — Dans le second cas, la tige métallique D communique avec la garniture extérieure d'une batterie, dont la garniture intérieure se décharge sur le robinet R.

Dans les expériences de Davy, la chambre barométrique B a constamment livré passage à la décharge électrique; mais l'intensité des phénomènes lumineux a varié consi-

dérablement avec la température. — Quand le tube était très chaud, la lumière se montrait avec une couleur verte, vive et de grande intensité; l'éclat de cette lumière était fort remarquable pendant l'ébullition du mercure. — A mesure que la température et la tension de la vapeur mercurielle s'abaissaient, le phénomène perdait de sa vivacité. — Vers 6°,7 centigrades au-dessous de *zéro*, la décharge d'une machine peu active ou d'une bouteille de Leyde faiblement chargée *passait* à travers la chambre B, mais sans produire de *lueur appréciable*. A cette température, avec une bouteille fortement chargée et même avec une machine très active, la chambre B s'illuminait d'une manière sensible dans l'obscurité. — A 29° centigrades au-dessous de *zéro*, les décharges *passaient* toujours, mais la lumière produite dans la chambre B était si faible, qu'il fallait une grande obscurité pour l'apercevoir.

Quand on introduisait dans la chambre B une série de bulles d'air, la couleur de la gerbe électrique passait d'abord au vert de mer, puis successivement au bleu et au pourpre.

Davy fit fondre de l'étain dans le tube, et prit de grandes précautions pour expulser complétement l'air; il fit ensuite passer des décharges à travers l'espace vide B placé au-dessus de la colonne métallique. Les phénomènes lumineux produits dans cette circonstance ressemblaient beaucoup à ceux qu'il avait obtenus avec du mercure au-dessous de *zéro*; seulement la lumière était jaune, et si pâle, qu'on ne l'apercevait que dans l'obscurité complète. L'élévation de la température n'exerçait

pas d'influence sensible sur l'éclat de la gerbe électrique.

Enfin Davy plaça successivement dans son appareil du beurre d'antimoine qui bout à 197°,8, et de l'huile d'olive pure, dont la température d'ébullition n'est pas très inférieure à celle du mercure. Les décharges traversèrent toujours la chambre B, mais la lumière était plus vive dans la vapeur de beurre d'antimoine que dans la vapeur d'huile d'olive, et dans la vapeur d'huile que dans la vapeur de mercure à la température ordinaire. — La lumière était blanche avec le beurre d'antimoine, et rouge pourpre avec l'huile d'olive.

Dans ces dernières années, M. Masson (1) a repris ces expériences sur la transmission de l'électricité à travers des chambres barométriques dans lesquelles la vapeur de mercure avait été raréfiée autant que possible. « J'ai fait con-» struire, dit-il, des baromètres à mercure, dans lesquels » la partie vide portait à ses extrémités des fils fins de pla-» tine. Après avoir déterminé l'abaissement du mercure, » on refroidissait la partie vide, et, par la chaleur, on fon-» dait le tube au point de séparation du vide et du mercure. » Pour rendre la fusion plus commode, on avait réuni » les deux parties du baromètre par un tube capillaire. » Les tubes de verre vides ainsi préparés avaient environ trois décimètres de longueur.

M. Masson a fait passer à travers ces tubes des décharges fournies tantôt par une machine, tantôt par une bouteille de Leyde. Un des fils du tube était en communication avec le sol ou avec la garniture extérieure de la bouteille,

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1851, t. XXXI, p. 309.

et l'autre fil recevait extérieurement une étincelle du conducteur de la machine ou de l'armure interne de la bouteille. — Chaque étincelle était accompagnée d'une lueur blanchâtre, pâle et phosphorescente, qui remplissait le tube tout entier.

Les expériences de Davy et de M. Masson s'accordent pour démontrer que les décharges électriques peuvent s'opérer à travers des espaces qui ne contiennent plus de *trace sensible* de *matière pondérable*, et que, même dans ces espaces vides, l'agent électrique détermine sur son passage des *phénomènes lumineux* appréciables.

§ II. — Effets lumineux des courants d'induction.

Dans le cinquième chapitre, en traçant l'histoire de la machine de Ruhmkorff, nous avons eu occasion d'insister d'une manière particulière sur la haute tension des courants fournis par les appareils d'induction. Avec une pile voltaïque ordinaire, ces appareils permettent d'obtenir des masses considérables d'électricité de tension, et de faire des expériences très brillantes, mais trop nombreuses pour que nous puissions les passer toutes en revue. Nous devons nous contenter de signaler les principales formes du phénomène lumineux.

Avec une batterie de quatre appareils de Ruhmkorff associés selon la méthode de M. L. Foucault (page 314, Fig. 382, 383), on obtient à l'air libre des étincelles de *dix* centimètres de longueur, volumineuses, très éclatantes, contournées en *zigzag*, accompagnées d'un craquement sec, en tout semblables à celles d'une forte

machine à plateau de verre. En raison de l'abondance de l'électricité fournie par la spirale induite, ces étincelles se succèdent avec tant de rapidité, que l'œil ne peut pas les séparer, et que les extrémités de l'excitateur semblent réunies par un trait de feu continu.

Quand on place une forte bouteille de Leyde sur le trajet du courant induit (page 298, Fig. 379), la distance explosive se raccourcit, mais l'étincelle prend un volume beaucoup plus considérable. Dans ce cas, les extrémités des branches de l'excitateur sont réunies par une bande lumineuse, droite, large et très éclatante. Ces dernières décharges élèvent la température des corps qu'elles traversent, et déterminent l'inflammation des feuilles de papier placées sur leur trajet; le craquement très sec qui les accompagne prend une très grande intensité. — On peut disposer l'expérience de manière à faire passer la décharge à travers la flamme d'une forte lampe à alcool. Alors, la résistance du milieu gazeux diminue, et la distance explosive s'allonge. Les extrémités des branches de l'excitateur sont réunies par un trait de feu très large, et assez brillant pour se détacher en lumière sur la flamme pâle de l'alcool.

Lorsqu'elle traverse les gaz et les vapeurs ramenés à un état de grande raréfaction, la décharge des appareils d'induction fournit une gerbe lumineuse remarquable par son étendue, son éclat et la vivacité de ses teintes. Dans ces circonstances, la lumière électrique revêt des caractères particuliers qui ont fortement attiré l'attention des physiciens.

Prenons un *œuf électrique* (Fig. 436), dont l'air intérieur

Fig. 436.

ait été épuisé avec une bonne machine pneumatique et ramené à une pression d'*un* à *deux* millimètres de mercure. Écartons les boules à *trente* centimètres environ, et mettons-les en communication avec les pôles d'un appareil de Ruhmkorff dont la spirale inductrice complète le circuit d'une pile de *six* à *huit* éléments de Bunsen. — Le courant induit *inverse* est arrêté par la résistance du gaz, le courant *direct* passe seul; l'*œuf* est traversé par une belle gerbe lumineuse, étroite à ses extrémités, renflée dans son milieu, et qui s'étend d'une boule à l'autre. Ce jet lumineux se compose de deux parties distinctes par leur étendue, leur coloration et leur forme, et séparées par un intervalle obscur. — Par une calotte représentant environ le *quart* de son étendue, la boule *positive* fournit une véri-

table gerbe de lumière rouge qui s'élargit peu à peu, occupe dans son milieu le tiers de la cavité de l'œuf, se rétrécit ensuite, et se termine par une extrémité libre arrondie. Cette lumière rouge a son *maximum* d'éclat à son point d'origine, pâlit à mesure qu'elle s'éloigne de la boule *positive*, et conserve toujours plus de vivacité dans sa partie médiane qu'à sa périphérie. — La boule *négative* et la tige qui la supporte sont complétement enveloppées d'une *triple* couche de lumière violette teintée de bleu. De ces trois couches, la plus étroite et la plus brillante est toujours celle qui touche immédiatement la boule *négative* et sa tige; la plus extérieure est caractérisée par sa teinte bleue violacée et par son épaisseur; la couche médiane paraît sombre entre les deux autres. — La gerbe rouge de la boule *positive* et la lumière violette de la boule négative ne se réunissent pas, elles restent constamment séparées par un intervalle complétement obscur d'environ *un* centimètre.

Quand on renverse le courant inducteur, le courant induit *direct* change de sens, et les boules de l'œuf changent de signes. Dans ce cas, la gerbe rouge part de la boule inférieure, et l'auréole violette entoure la boule supérieure; le sens du phénomène lumineux et le sens du courant *direct* qui *seul* traverse l'œuf se renversent en même temps, mais la disposition relative des deux lumières, rouge et violette, reste la même.

L'apparition d'une auréole violette autour de la boule *négative* et de sa tige, ainsi que la séparation par un intervalle obscur de la lumière violette et de la gerbe rouge, avait déjà été signalée par MM. Masson et Breguet

dans leur Mémoire sur l'induction (1). Du reste, cette disposition n'est pas particulière aux décharges des appareils d'induction. Avec une forte machine électrique (page 480, Fig. 431), nous avons toujours vu la boule négative de l'*œuf* électrique enveloppée d'une auréole violette; et, quand la décharge de la machine se fait sans étincelle extérieure (page 485, Fig. 434), la gerbe rouge de la boule *positive* est séparée par un intervalle obscur de l'auréole violette de la boule *négative*.

M. Ruhmkorff a, le premier, observé une modification très remarquable qu'éprouve la lumière électrique, lorsque, avant de faire le vide, on introduit des vapeurs d'alcool dans l'œuf. La gerbe lumineuse est alors traversée par des bandes obscures, nombreuses, étroites et perpendiculaires à son axe. En 1852, ce phénomène de la *stratification* de la lumière électrique a été étudié, presque en même temps, par M. Grove (2) et par M. Quet (3). Les vapeurs d'esprit-de-vin, d'essence de térébenthine, d'huile de naphte, de sulfure de carbone, de bichlorure d'étain, de phosphore, etc., quand on les introduit dans l'œuf et que l'air est ensuite bien épuisé, peuvent, comme les vapeurs d'alcool, servir à mettre en évidence cette *stratification* de la gerbe lumineuse.

Dans ces circonstances (Fig. 437), l'auréole violette de la boule *négative* et de sa tige conserve son aspect ordinaire; elle est toujours composée de trois couches distinctes par

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1842, t. IV, p. 145.

(2) *Ibid.*, 1853, t. XXXVII, p. 376.

(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1852, t. XXXV, p. 949.

leur éclat et par leur épaisseur. Mais la gerbe fournie par la boule *positive* est coupée par des bandes obscures, nombreuses, serrées, très distinctes et perpendiculaires à son axe ; elle est composée d'une succession de *strates* alternativement brillantes et obscures. — Vers le milieu de la gerbe les *strates* sont sensiblement planes ; à partir de cette région elles s'incurvent, et leur courbure est d'autant plus prononcée, qu'elles se rapprochent davantage des boules de l'appareil. Ces deux systèmes de strates courbes qui terminent la gerbe se regardent par leur convexité, et tournent leur concavité, l'un vers la boule *positive*, l'autre vers la boule *négative*. D'ailleurs, l'auréole violette de la boule *négative* et la gerbe *stratifiée* de la boule positive restent toujours séparées par un large espace com-

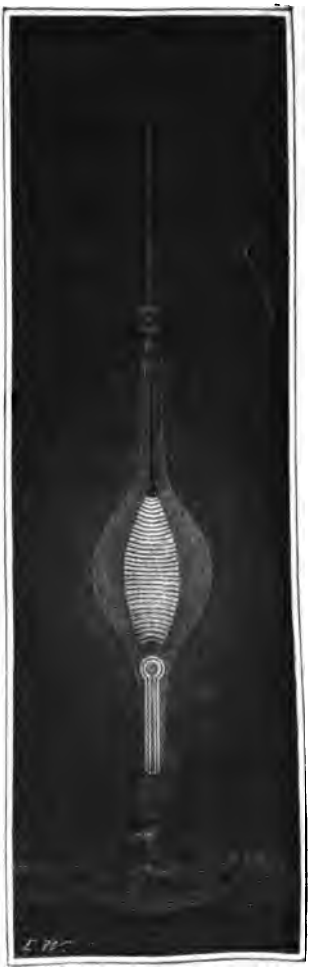


Fig. 437.

plétement obscur. — Quand on laisse marcher librement le marteau de l'interrupteur, ces strates paraissent animées de mouvements oscillatoires et giratoires qui troublent la netteté du phénomène. Pour rendre cette disposition stratifiée très évidente, M. Quet conseille de ralentir la succession des décharges de l'appareil, et même de manœuvrer le marteau à la main.

Dans les expériences faites avec les appareils d'induction, en raison de la grande abondance des rayons *ultra-violets* dans la radiation électrique et de la fluorescence du verre, les parois de l'œuf électrique paraissent lumineuses et prennent une teinte bleu verdâtre très agréable à l'œil.

La forme de l'œuf électrique et la position des boules polaires par rapport à sa partie élargie influent beaucoup sur la configuration de la gerbe lumineuse, et les teintes des flux lumineux émanés des deux pôles varient avec la nature des vapeurs qui remplissent l'appareil. Mais, dans tous les cas, les caractères généraux du phénomène restent les mêmes.

Dans ces derniers temps, M. Ruhmkorff a mis à la disposition des physiciens des tubes de verre représentant des espaces clos et remplis de vapeurs très raréfiées, qui permettent de reproduire très facilement les expériences de lumière électrique sous des formes très variées. La Figure 438 représente un de ces appareils composé d'une succession d'ampoules et de tubes cylindriques. Les ampoules extrêmes sont traversées par des fils de platine qui servent à mettre l'appareil en communication avec les pôles de la bobine induite d'une machine d'induction.

Au moment où le circuit de la spirale inductrice est fermé, l'appareil est traversé par un flot de lumière dont les caractères ne restent pas les mêmes dans tous les points de son trajet. — Les tubes sont remplis de strates lumineuses épaisses et brillantes, séparées par des lignes obscures, fines et très nettement dessinées. Par l'extré-

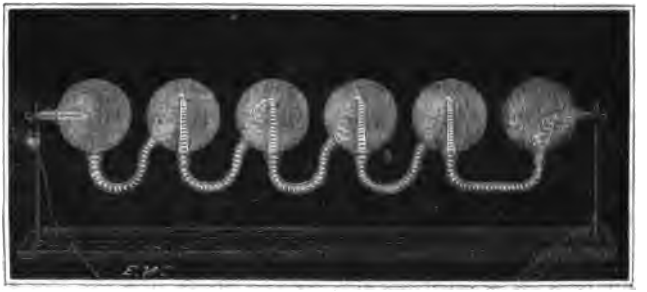


Fig. 438.

mité de chacun de ces tubes, la lumière déborde dans l'ampoule correspondante, en strates pâles, légères, fortement espacées, qui établissent une communication entre les tubes successifs. — Le fil de platine *positif* présente quelques points très brillants d'où s'échappent des strates pâles et légères, qui traversent la première ampoule et se relient aux strates du premier tube. — Le fil de platine *négatif* est enveloppé d'une auréole mince et très éclatante; l'ampoule correspondante est pleine d'une lumière douce et uniforme; les strates s'arrêtent nettement à l'orifice du dernier tube, et ne pénètrent pas dans l'ampoule correspondante au fil *négatif*. — Les parois de

l'appareil deviennent lumineuses par fluorescence, et prennent une teinte bleu verdâtre. L'ampoule qui correspond au fil de platine *positif* garde seule son aspect ordinaire, ses parois ne présentent aucune trace de fluorescence.

Nous ne dirons rien des diverses explications qui ont été données de cette composition stratifiée de la gerbe lumineuse; aucune ne nous paraît rendre compte d'une manière satisfaisante de toutes les particularités du phénomène. Mais nous devons, en terminant, parler d'une expérience très intéressante de M. Van der Willingen (1).

Ce physicien est parvenu à produire la stratification de la gerbe lumineuse, avec l'électricité fournie par une machine ordinaire à plateau de verre. L'armure interne d'une bouteille de Leyde communiquait avec le conducteur de la machine et avec une des boules de l'œuf électrique rempli de vapeurs d'essence de bergamote sous la pression de *trois* millimètres; l'armure externe communiquait avec le sol et avec l'autre boule de l'œuf. — Quand toutes les communications étaient *métalliques*, la gerbe lumineuse ne présentait aucune trace de *stratification*. — Mais, quand la communication d'une des boules et de la bouteille s'opérait par l'intermédiaire d'une *corde mouillée*, la vitesse de la décharge était ralentie, et l'œuf se remplissait d'une belle gerbe de lumière *stratifiée*. — Par le même procédé, on obtient aussi de la lumière *stratifiée* dans la chambre barométrique; la vapeur de mercure joue le même rôle que les vapeurs d'alcool, d'essence de térébenthine, etc.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1857, t. L, p. 126.

Ces expériences de M. Van der Willingen, en établissant un nouveau rapprochement entre l'électricité statique et l'électricité dynamique, déposent en faveur de ce que nous avons dit (page 323), de la place que les appareils d'induction occupent, dans la série des électromoteurs, entre les machines électriques à plateau de verre et les piles hydro-électriques.

§ III. — Effets lumineux des courants voltaïques.

Quand on ferme le circuit d'une pile en rapprochant graduellement les extrémités des rhéophores, il devient nécessaire (page 154) d'employer des appareils d'une très grande puissance pour obtenir des étincelles appréciables. Il n'en est plus de même lorsqu'on sépare les extrémités des conducteurs interpolaires; dans ce cas, en effet, même avec une pile ordinaire, la rupture du circuit détermine la production d'une étincelle très marquée accompagnée d'un pétillement particulier. Les causes de la supériorité des étincelles de rupture sont faciles à comprendre. — Quand le circuit voltaïque est ouvert, les extrémités graduellement rapprochées des fils conjonctifs ne peuvent échanger d'étincelle qu'au moment où la résistance de la couche d'air interposée est inférieure à la différence des tensions polaires de la pile ; or, comme dans tous les cas ces tensions polaires sont très faibles, il est évident que la décharge *avant le contact* ne peut s'effectuer qu'à de très petites distances. — Si, au contraire, le circuit étant fermé, on sépare les extrémités des rhéophores, l'épaisseur et la résistance de la couche d'air interposée, d'abord

extrêmement faibles, augmentent graduellement et par addition de quantités très minimes. Au premier moment de la séparation, l'électricité se fraye un passage à travers la couche d'air très mince qui sépare les rhéophores; les nouvelles résistances dues à l'écartement progressif des extrémités des fils conjonctifs sont successivement surmontées par les tensions polaires très faibles, mais maintenues constantes par le travail intérieur de la pile; le passage de l'électricité continue, et l'étincelle *de rupture* est prolongée bien au delà des limites de la distance explosive des surfaces polaires *avant le contact*.

De très belles étincelles apparaissent aussi dans les liquides, quand on rompt le circuit d'une pile très forte dont les rhéophores immergés sont terminés par des cônes de charbon. Davy (1) a le premier obtenu des phénomènes de ce genre dans des liquides isolants, tels que les huiles fixes et volatiles, l'éther, l'accool, etc., et dans des liquides mauvais conducteurs, tels que l'acide sulfurique et l'acide azotique étendus d'eau. Dans ces cas divers, la transmission de l'électricité dynamique détermine à la fois la production de vives étincelles, et la décomposition du liquide traversé.

Dans l'air à la pression ordinaire comme dans l'air raréfié, l'étincelle fournie par une puissante pile se transforme en un jet continu de lumière qui remplit tout l'espace compris entre les extrémités des conducteurs interpolaires, jouit de propriétés spéciales, et prend le nom d'*arc voltaïque*.

(1) *Biblioth. Britannique*, 1813, t. LIII, p. 228.

Arc voltaïque. — L'arc voltaïque a été découvert et étudié avec soin par Davy (1), dans le cours de ses belles recherches sur les effets chimiques de l'électricité dynamique. La pile employée était une puissante batterie de 2000 couples; chaque élément était composé d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc plongées dans de l'eau acidulée; chaque lame métallique avait 206 centimètres carrés de surface. Les extrémités des conducteurs interpolaires (Fig. 439) étaient armées de cônes de charbon

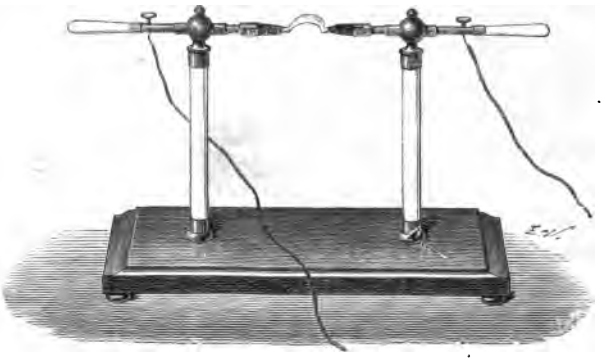


Fig. 439.

de bois de 3 centimètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre, fortement calcinés et éteints dans le mercure. Des supports isolants permettaient de rapprocher et d'éloigner à volonté ces cônes de charbon maintenus dans une position horizontale. — A environ un demi-millimètre de distance, les extrémités des charbons

(1) *Biblioth. Britannique*, 1813, t. LIII, p. 225.

se déchargeaient spontanément l'une sur l'autre, et restaient réunies par un jet lumineux d'un éclat éblouissant; les charbons eux-mêmes s'échauffaient, et devenaient incandescents dans la moitié de leur longueur. — A l'air libre, on pouvait alors écarter graduellement les charbons jusqu'à une distance de 10 à 11 centimètres; il passait de l'un à l'autre *une gerbe de feu continue*, un véritable *arc lumineux* convexe vers sa partie supérieure. — Sous le récipient de la machine pneumatique, à la pression de *six* millimètres de mercure, la distance entre les extrémités des charbons pouvait être portée à 18 centimètres; l'électricité continuait à passer sous la forme d'une très belle gerbe de lumière pourpre. Dans cet air raréfié, les charbons étaient fortement incandescents; un fil de platine roulé autour de ces charbons s'échauffait assez pour fondre avec une scintillation brillante, et tomber en gros globules sur le fond du récipient. Cette dernière expérience prouve d'une manière évidente que la lumière et la chaleur de l'arc voltaïque ne sont pas dues à la combustion des cylindres de charbon fixés aux extrémités des conducteurs interpolaires.

La lumière de l'arc voltaïque produit dans les circonstances précédentes affecte une disposition spéciale. Les extrémités de la gerbe sont plus brillantes que sa partie médiane; le maximum d'éclat existe dans le voisinage du pôle positif.

Lorsque l'arc voltaïque est établi entre deux morceaux de charbon, le fragment qui joue le rôle de pôle positif se creuse à son extrémité, éprouve une véritable perte de substance. Des particules de charbon enlevées au pôle

positif, les unes se combinent avec l'oxygène, les autres sont transportées à l'état d'incandescence sur l'extrémité du fragment de charbon qui joue le rôle de pôle négatif.— On peut aussi prendre pour pôle négatif une baguette de charbon, et pour pôle positif un large cylindre de charbon dont l'extrémité libre est creusée d'une cavité dans laquelle on place un fragment de métal. Dans ce cas, on ferme le circuit en établissant le contact entre le charbon négatif et le métal positif; ce dernier s'échauffe et fond. On éloigne alors graduellement le charbon négatif, l'arc voltaïque s'établit, et des particules métalliques sont transportées à l'état d'incandescence du pôle positif au pôle négatif.— Ces phénomènes de transport ont été étudiés et décrits avec beaucoup de soin par M. de La Rive (1); ils s'observent également quand l'arc voltaïque est produit entre deux surfaces polaires complétement métalliques. Des expériences de M. Van Breda (2) tendent à établir qu'il y a aussi un transport de matière du pôle négatif au pôle positif. M. Matteucci (3) a vérifié l'exactitude des observations de M. Van Breda ; seulement le transport de matière lui a toujours paru s'effectuer en proportions plus considérables du pôle positif au pôle négatif que dans le sens contraire.

La pile restant la même, la nature des pôles exerce une grande influence sur l'éclat et l'étendue de l'arc voltaïque qu'on peut obtenir. — A l'air libre, quand les deux sur-

(1) *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 262. — *Biblioth. univ. de Genève*, 1847, t. IV, p. 343.

(2) *Biblioth. univers. de Genève*, 1846, t. III, p. 33.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1849, t. XXVII, p. 41.

faces polaires sont métalliques et de même nature, M. Grove (1) a observé que l'arc voltaïque est d'autant plus brillant et d'autant plus long, que le métal employé est lui-même plus oxydable et plus facile à volatiliser.

Le fait suivant, observé par MM. L. Foucault et Fizeau (2), prouve que, dans le cas où les surfaces polaires ne sont pas de même nature, le sens du courant influe beaucoup sur la beauté du phénomène lumineux. La pile employée était composée de 80 couples de Bunsen; l'un des pôles était terminé par de l'argent et l'autre par du charbon. « Le pôle positif étant de l'argent et le négatif » du charbon, l'arc se forme facilement; bientôt l'argent » fond et distille abondamment: dès lors on peut éloigner » davantage le charbon négatif sans rompre l'arc lumi- » neux, qui est d'une fixité et d'une beauté remarquables. » Si l'on intervertit les pôles, le phénomène n'est plus le » même. Dans les premiers instants, l'arc se forme, comme » précédemment, du charbon positif à l'argent négatif; » mais lorsque l'argent est entré en fusion, l'arc se brise. » Si l'on cherche à le rétablir, on éprouve beaucoup de » difficultés; lorsqu'on y parvient pendant quelques in- » stants, la partie de l'arc qui touche au globule d'argent » s'agite avec un bruit particulier.

» Le platine et le charbon présentent un phénomène » analogue, mais à un degré beaucoup moins marqué. »

Il résulte des observations précédentes que l'arc voltaïque est la manifestation du passage du courant élec-

(1) *Bibliothèque univers. de Genève*, 1840, t. XXV, p. 426.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1844, t. XI, p. 370.

trique à travers l'atmosphère conductrice formée par les particules matérielles arrachées aux extrémités des rhéophores, et transportées d'un pôle à l'autre à l'état d'incandescence.

La haute température de l'arc voltaïque a été parfaitement observée et caractérisée par Davy. « Lorsqu'on introduisait, dit-il, dans cet arc une substance quelconque, elle devenait aussitôt incandescente ; le platine s'y fondait comme la cire à la flamme d'une chandelle ; le quartz, le saphir, la magnésie, la chaux, tout ce qu'il y a de plus réfractaire entrait en fusion. Des fragments de diamant, des pointes de charbon et de la plombagine disparaissaient subitement et semblaient s'évaporer dans ce foyer, même lorsqu'on formait le circuit dans un récipient vidé d'air par la pompe pneumatique. Mais ces dernières substances ne semblaient pas subir une fusion préalable. »

Dans leur travail sur l'arc voltaïque, MM. L. Foucault et Fizeau (1) ont signalé un fait très intéressant. Sous l'influence de la haute température de l'arc, ils ont vu le charbon *très dense* qui provient de la distillation de la houille changer complétement de caractères physiques. Les particules transportées au pôle négatif constituent un charbon *mou, traçant*, qui ressemble complétement au graphite ; la même modification se produit à la surface du charbon qui joue le rôle de pôle positif. Ils ont obtenu des résultats analogues avec d'autres espèces de charbon employées comme conducteurs polaires.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1844, t. XI, p. 370.

M. Jacquelain (1) a vu le diamant, placé dans un arc voltaïque fourni par une pile de 100 éléments de Bunsen, passer au rouge blanc, puis se ramollir; le diamant était alors à l'état de coke. Ainsi modifié, le diamant raye encore le verre; mais il n'a presque plus de cohésion, et se brise entre les doigts.

M. Despretz a fait des expériences nombreuses sur les effets calorifiques de l'arc voltaïque (2). Il employait de 500 à 600 éléments de Bunsen partagés en 5 ou 6 séries. Son appareil était disposé de manière à pouvoir opérer tantôt dans le vide, tantôt dans divers gaz, à la pression ordinaire ou à des pressions de plusieurs atmosphères, et à faire concourir l'action de la chaleur fournie par la lumière solaire et par le chalumeau à gaz avec celle de l'arc voltaïque. A l'aide de ces puissants moyens, M. Despretz a obtenu les résultats suivants:

1° Le charbon peut être manifestement réduit en vapeur. Tout charbon, le diamant lui-même, se transforme en graphite sous l'influence de cette haute température.

2° Le diamant est fondu comme toute espèce de charbon; des tiges de charbon peuvent être courbées et soudées.

3° Le bore, le silicium, la magnésie, le platine, le titane, le tungstène, ont été fondus et volatilisés.

4° La volatilisation lente du charbon dans l'arc de l'appareil d'induction fournit de petits octaèdres *noirs*,

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1847, t. XXIV, p. 1050.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1849, t. XXVIII, p. 755; — t. XXIX, p. 48, 545, 709; — 1850, t. XXX, p. 367; — 1853, t. XXXVII, p. 369, 443.

et quelques octaèdres *blancs*, *translucides*. Cette poudre *noire* est assez dure pour polir les rubis.

Les corps qui servent à transmettre le courant participent aussi à cette haute température de l'arc voltaïque. M. Matteucci (1) a mesuré directement, avec des pinces thermo-électriques, la température acquise par les métaux employés comme surfaces polaires. Il résulte de ses expériences que l'échauffement est toujours plus considérable au pôle positif qu'au pôle négatif. Cet excès de température doit nécessairement faciliter les phénomènes d'arrachement du côté de la surface positive; M. Matteucci pense que cette circonstance est de nature à expliquer pourquoi le mouvement de transport de particules matérielles incandescentes est plus intense du pôle positif au pôle négatif que dans le sens opposé. Ajoutons ici que M. Despretz, en opérant sur le flux électrique fourni par l'appareil de Ruhmkorff, a constaté que la température du pôle négatif du courant d'induction est toujours supérieure à celle du pôle positif.

Immédiatement après avoir découvert que le courant électrique a la propriété d'aimanter une aiguille de fer ou d'acier, Arago (2) annonça que l'arc voltaïque produit dans l'air ou dans le vide de la machine pneumatique devait agir sur une aiguille aimantée, et être, à son tour, influencé par les pôles d'un aimant. — L'exactitude de cette prévision de l'illustre physicien français ne tarda pas à être vérifiée par Davy lui-même.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1849, t. XXVII, p. 41.
(2) *Ibid.*; 2e série, 1820, t. XV, p. 101.

Il suffit, en effet, de présenter le pôle d'un fort aimant à un arc voltaïque, pour que la forme du faisceau lumineux soit modifiée. L'arc voltaïque se conduit comme un fil métallique mobile traversé par un courant. L'action de l'aimant peut être assez énergique pour interrompre la communication établie entre les surfaces polaires par les particules matérielles transportées; dans ce cas, l'arc est rompu. — M. Quet (1) a fait une étude détaillée de ce phénomène. Ses recherches ont été faites avec l'électro-aimant horizontal et très puissant de M. Ruhmkorff (Fig. 384, page 329). Les charbons conducteurs étaient placés l'un au-dessus de l'autre et perpendiculairement à la ligne axiale de l'électro-aimant; leurs pointes étaient entre les deux pôles très voisins de l'appareil. Avec la pile employée, quand l'électro-aimant était inactif, l'arc était vertical et pouvait acquérir *quatre millimètres* de longueur. Quand, au contraire, l'appareil était en action, la lumière électrique était projetée latéralement et horizontalement sous forme d'un dard d'un bel éclat, d'une très haute température et de *trois* à *quatre centimètres* de longueur; mais, dans ce cas, M. Quet ne pouvait pas, sans rompre l'arc, éloigner les charbons de plus d'*un millimètre*. De temps en temps, des particules incandescentes de charbon étaient lancées dans la direction du dard électrique. D'ailleurs, le côté de la ligne axiale vers lequel la pointe du dard électrique est dirigée change en même temps que le sens du courant de la pile. — Lorsque, sans rien changer à la position des

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1852, t. XXXIV, p. 805.

charbons, on éloigne les pôles de l'électro-aimant, le dard électrique diminue d'étendue, et la distance *maximum* qu'on peut donner aux charbons, sans que l'arc s'éteigne, augmente graduellement. A partir d'un certain éloignement des pôles magnétiques, le dard ne se forme plus ; seulement l'arc se courbe, et sa convexité se tourne du côté où le dard était dirigé. Puis, si l'éloignement des pôles devient plus considérable, la courbure de l'arc s'affaiblit et finit par disparaître. Dans toutes ces expériences, l'étendue de la partie incandescente des charbons polaires varie en sens inverse de celle du dard électrique.

M. Quet a observé que le dard électrique s'accompagne d'un bruissement particulier semblable à celui du chalumeau. De plus, au moment où l'arc se rompt et où le dard s'éteint par suite de l'éloignement des charbons, il se produit un bruit sec et très intense. M. de La Rive (1), dans ses recherches sur l'arc voltaïque, avait déjà signalé ce phénomène de bruissement, et aussi la détonation, quelquefois très forte, qui se produit au moment de la rupture de l'arc dans le voisinage des pôles d'un aimant.

Savary (2) est parvenu à aimanter une aiguille, en l'exposant à l'action de la décharge d'une bouteille de Leyde traversant un tube de verre dont l'air avait été épuisé avec une excellente machine pneumatique. Ayant ajusté au tube de verre un conducteur métallique de même diamètre, la décharge aimanta au même degré des aiguilles placées à la même distance de la tige mé-

(1) *Bibl. univ. de Genève*, 1847, t. IV, p. 315.
(2) *Compt. rend. de l'Académie des sciences*, 1838, t VII, p. 687.

tallique et du tube de verre. Cette expérience nous a paru devoir être rapprochée des faits qui démontrent les propriétés électro-magnétiques de l'arc voltaïque ; elle prouve en même temps que la loi d'*égalité d'intensité* du courant s'applique même au cas où l'électricité est transmise à travers un gaz aussi raréfié que possible.

Régulateur de la lumière voltaïque. — En 1844, M. L. Foucault (1) présenta à l'Académie des sciences un microscope photo-électrique dont la source de lumière était considérablement améliorée. Aux cônes de charbon de bois éteint dans le mercure employés par Davy, il avait substitué des baguettes prismatiques carrées, de 2 à 3 millimètres de côté, taillées dans la masse du coke, appelé communément *charbon de gaz*, qui se dépose sur les parois des cornues où l'on distille la houille pour en obtenir le gaz d'éclairage. Ce coke est très conducteur, très dense et très peu combustible ; ces propriétés le rendent supérieur à toute autre variété de charbon pour le dégagement de la lumière électrique. Dans le microscope de M. L. Foucault, la lumière était blanche, vive, et d'un éclat assez soutenu pour permettre l'observation.

Mais, quelle que soit la variété de charbon employée, le passage de l'électricité détermine un transport de matière du pôle positif au pôle négatif; de plus, quand on agit à l'air libre, le charbon est brûlé et transformé en acide carbonique. Sous l'influence de cette double cause, la distance des extrémités des charbons polaires augmente

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sciences*, 1844, t. XVIII, p. 696.

sans cesse, la résistance du circuit devient de plus en plus considérable, le courant perd de son intensité, et l'éclat de l'arc voltaïque s'affaiblit graduellement. Pour rendre la lumière électrique constante, il devient donc nécessaire de disposer l'appareil de manière que les charbons soient animés d'un mouvement de rapprochement qui annule les effets de l'usure, et maintienne leurs extrémités à une distance sensiblement invariable. C'est encore à M. L. Foucault qu'on doit la solution de ce problème intéressant ; en 1849, il communiqua à l'Académie des sciences (1) une combinaison fort ingénieuse qui permet de rendre l'intensité de la lumière constante, et de donner à l'arc voltaïque une position invariable dans l'espace.

La Figure 440 représente le régulateur de M. L. Foucault (2). Cet appareil est partagé en deux étages par un plancher de bois NN'. L'étage inférieur est à jour ; l'étage supérieur est une boîte complétement fermée dont la paroi antérieure a été enlevée.

Les charbons polaires D, D', sont montés sur deux tiges métalliques fixées, au moyen de deux ressorts r, r', à deux chariots C, C', qui roulent dans des coulisses destinées à les empêcher de dévier. Ces deux chariots sont constamment sollicités, par les ressorts R, R', à marcher l'un vers l'autre. Mais le chariot C est retenu en place par un fil de soie f relié à un mouvement d'horlogerie H dont

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sciences*, 1849, t. XXVIII, p. 68.

(2) L'appareil de M. L. Foucault a été décrit avec beaucoup de soin dans la seconde édition du *Dictionnaire des arts et manufactures* de M. C. Laboulaye. Notre description est empruntée en grande partie à cet excellent article.

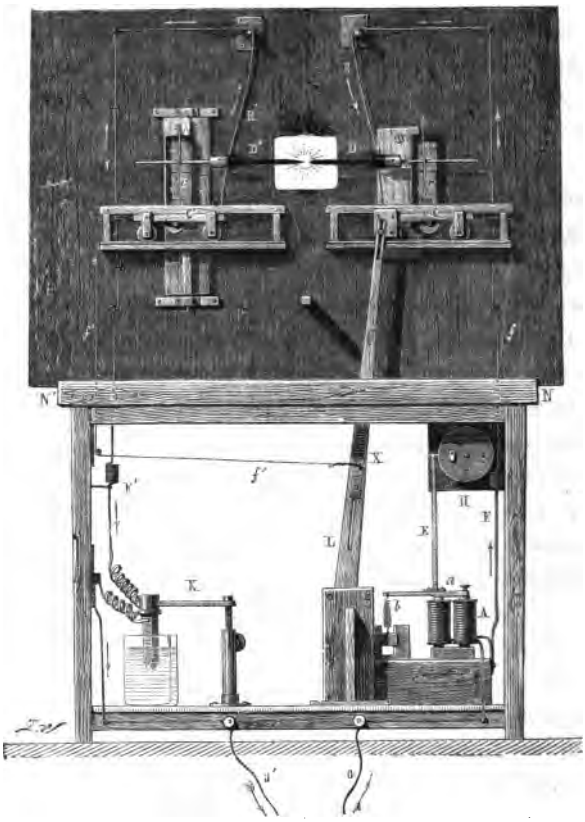


Fig. 440.

la roue d'échappement butte contre l'extrémité de la détente E. Un levier L, mobile autour de son extrémité inférieure. vient se fixer au chariot C et participe à ses mouvements: Le chariot C′ est retenu de son côté par un fil de soie *f′f′* attaché à un curseur X mobile le long du levier L. Tant que la détente E est en prise avec la roue d'échappement, les deux chariots sont nécessairement immobiles. Mais, du moment que la détente E délivre la roue d'échappement, le chariot C cède à la traction du ressort R, entraîne avec lui le levier L, et permet au chariot C′ d'avancer sous l'influence du ressort R′; ce double mouvement dure tant que la roue d'échappement reste libre, et cesse au moment où elle butte de nouveau contre la détente E. Les deux chariots sont donc assujettis à se mouvoir ensemble, mais avec des vitesses inégales. Il résulte, en effet, de la construction de l'appareil, que les déplacements de C et de C′ sont dans le rapport de la longueur totale du levier L et de la distance qui sépare le curseur X de l'extrémité inférieure du levier. Cette condition était nécessaire, puisque le charbon *positif* D s'use *plus vite* que le charbon *négatif* D′. En donnant au curseur une position convenable sur le levier L, on peut toujours régler les vitesses relatives des deux chariots de manière que les extrémités des charbons polaires restent à la même distance et occupent la même position dans l'espace.

La véritable difficulté à résoudre est la suivante : régler la détente E de manière qu'elle soit en prise avec la roue d'échappement quand la distance interpolaire est convenable, et qu'elle délivre cette roue quand, par le fait de

l'usure des charbons D, D', cette distance est trop considérable. M. L. Foucault a confié cette fonction délicate au courant voltaïque lui-même.

Le courant qui doit produire l'arc voltaïque entre les deux charbons D, D', traverse les bobines d'un électro-aimant en fer à cheval A. Le contact de fer doux *a* est attiré par l'électro-aimant, et sollicité à s'en éloigner par un ressort antagoniste *b*. La détente E est montée sur ce contact *a*, et se meut avec lui. Or, l'énergie de l'électro-aimant A varie dans le même sens que l'intensité du courant qui dépend elle-même de la distance interpolaire. Dès lors, quand les charbons D, D', sont à une distance convenable, le contact *a* cède à l'attraction de l'électro-aimant qui l'emporte sur la résistance du ressort *b*, et entraîne la détente E qui entre en prise avec la roue d'échappement du mouvement d'horlogerie H; les chariots s'arrêtent, et restent au repos tant que le courant conserve la même intensité.— Mais les charbons polaires s'usent et la distance interpolaire augmente; le courant et l'électro-aimant s'affaiblissent, le ressort *b* entraîne le contact *a* et, avec lui, la détente E, qui délivre la roue d'échappement. Alors les chariots marchent l'un vers l'autre; la distance interpolaire diminue, le courant reprend son intensité primitive, le contact *a* se rapproche de l'électro-aimant, la détente E entre en prise avec la roue d'échappement, et le mouvement des chariots est de nouveau arrêté.

Le rapprochement des charbons destinés à maintenir la distance interpolaire constante est donc intermittent; mais, quand tous les organes sont bien réglés, les périodes

de repos et d'avancement se succèdent assez rapidement pour qu'elles équivalent à un mouvement de progression continue. La marche de l'électricité est d'ailleurs facile à comprendre. Le courant arrive par le fil O, traverse les spires de l'électro-aimant A, passe dans un fil métallique F fixé contre la paroi postérieure de l'appareil, et gagne le ressort R qui le transmet au ressort *r* et au charbon positif D. Le courant traverse l'espace interpolaire sous forme d'arc lumineux, gagne le charbon négatif D′ et le ressort *r*′, passe au ressort R′, descend le long d'un fil métallique F′ fixé contre la paroi postérieure de l'appareil, traverse le rhéostat K et se rend au pôle négatif de la pile par le fil O′.

Le rhéostat K sert à régler l'intensité du courant ; il se compose de deux lames de platine isolées l'une de l'autre, disposées parallèlement, à la distance d'un centimètre, et plongées dans une dissolution de sulfate de potasse. On peut à volonté renforcer ou affaiblir le courant, en augmentant ou en diminuant l'étendue des surfaces immergées des lames de platine.

Malgré tous les efforts qui ont été faits, dans ces dernières années, pour obtenir un éclairage électrique d'intensité constante, l'appareil de M. L. Foucault est encore celui dont la marche est la plus régulière, qui remplit le plus complétement toutes les conditions nécessaires pour assurer la fixité du point lumineux, et qui fournit les résultats les plus satisfaisants.

§ IV. — Intensité de la lumière électrique.

L'intensité de la lumière électrique a été étudiée dans les étincelles de décharge des condensateurs, et aussi dans l'arc voltaïque.

Etincelles de décharge. — M. Masson a publié (1) des recherches d'une haute importance sur la photométrie électrique. Dans ses expériences, il a pris pour source de lumière le jet d'étincelles fournies, à l'air libre, par des condensateurs à lames de verre recouvertes d'une mince feuille d'étain sur chacune de leurs faces; la lumière fixe et constante d'une très bonne lampe Carcel était employée comme moyen de comparaison. Nous ne pouvons pas entrer ici dans les détails de l'appareil instrumental de M. Masson; nous devons nous borner à faire connaître les principaux résultats dont ses travaux ont enrichi la science.

En examinant à la loupe les sphères métalliques qui avaient servi à produire de nombreuses étincelles, M. Masson les a trouvées profondément altérées aux points d'explosion; leur surface était hérissée d'aspérités et parsemée de petites cavités. Dans le cas des décharges des condensateurs comme dans celui de l'arc voltaïque, les particules matérielles transportées forment donc deux courants qui cheminent à la fois, l'un dans le sens de la propagation de l'électricité, l'autre en sens inverse. Et

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e sér., 1845, t. XIV, p. 129. — — 1850, t. XXX, p. 5. — 1851, t. XXXI, p. 295. — 1855, t. XLV, p. 385.

cependant, à la suite d'une série de longues étincelles échangées à l'air libre, les sphères polaires n'avaient pas subi une élévation de température appréciable, et leur surface ne présentait pas la moindre trace d'oxydation. Hâtons-nous d'ajouter que ce sont les métaux les moins *tenaces*, et non les métaux les plus *fusibles*, dont la surface s'altère le plus facilement et le plus profondément sous l'influence des fortes décharges électriques. Ces faits portent à considérer le transport de matière produit par l'électricité comme un simple phénomène d'*arrachement* de particules solides, et non comme un phénomène de *fusion*. M. Masson a encore observé que, toutes choses égales d'ailleurs, les sphères métalliques les plus profondément altérées, celles qui avaient cédé le plus de particules matérielles au mouvement de transport, étaient aussi celles qui, employées comme surfaces polaires, avaient fourni les phénomènes lumineux les plus intenses. Le mode de transmission de l'électricité est donc le même dans le jet d'étincelles des condensateurs et dans l'arc voltaïque. Dans l'un et l'autre cas, il s'établit, entre les deux surfaces polaires, une atmosphère de particules matérielles transportées, à travers laquelle se propage l'agent électrique ; l'intensité du phénomène lumineux augmente avec la conductibilité de cette atmosphère, ou avec la quantité de particules arrachées et entraînées dans un temps donné.

M. Masson a fait une étude très approfondie des conditions qui influent sur l'intensité de la lumière des étincelles fournies par les condensateurs; des mesures directes, très nombreuses et exécutées dans les circon-

stances les plus variées, lui ont permis d'établir les deux lois suivantes :

Première loi. — L'intensité varie proportionnellement à l'étendue de la surface du condensateur, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame de verre placée entre ses deux armures.

Deuxième loi. — L'intensité varie proportionnellement au carré de la distance explosive.

Ces lois sont indépendantes de la nature des surfaces métalliques polaires. La nature des sphères métalliques employées comme pôles de l'étincelle influe sur l'intensité absolue de la lumière, mais nullement sur les lois de ses variations. D'ailleurs, ainsi que nous l'avons dit plus haut, les métaux dont la *ténacité* est la plus faible, par cela seul qu'ils se prêtent plus facilement à l'arrachement des particules, sont ceux qui fournissent les étincelles les plus brillantes.

Cela posé, soient :

h, un coefficient qui reste constant pour des sphères polaires de même nature, et qui varie seulement avec la nature de ces sphères ;

d, la distance à laquelle l'étincelle est produite ;

s, la surface du condensateur ;

a, l'épaisseur de la lame de verre ;

I, l'intensité de la lumière de l'étincelle.

La lumière de l'étincelle observée à l'*unité* de distance aura nécessairement une intensité représentée par l'équation suivante :

$$I = h \frac{d^2 s}{a}.$$

Par conséquent, si nous donnons à l'épaisseur a de la lame de verre du condensateur une valeur égale à l'*unité d'épaisseur*, nous aurons

$$I = hd^2s.$$

Mais, d'après les expériences de M. Riess (vol. I, page 192), la distance explosive d d'un condensateur est fournie par l'équation

$$d = b\frac{Q}{s}.$$

Dans cette équation, b est une constante; Q représente la quantité d'électricité accumulée dans le condensateur, et s la surface du condensateur.

Remplaçant d par sa valeur dans l'équation précédente et appelant k la *constante* hb^2, nous aurons

$$I = k\frac{Q^2}{s} = k\frac{Q}{s}Q.$$

Mais le rapport $\frac{Q}{s}$ n'est autre chose que la tension E du condensateur au moment de l'explosion. Remplaçant $\frac{Q}{s}$ par E, nous avons enfin, pour mesure de l'intensité de la lumière de l'étincelle :

$$I = kEQ.$$

Si nous rapprochons cette dernière expression de l'intensité de la lumière de l'étincelle de l'équation (1) de la page 425, qui représente la quantité de chaleur communiquée par une décharge électrique à un fil métallique

de nature, de longueur et de diamètre donnés, nous arrivons à la conclusion suivante :

Dans un circuit invariable, l'intensité de la lumière de l'étincelle produite au point d'interruption, et la quantité de chaleur communiquée à un fil métallique donné par une décharge électrique, varient suivant les mêmes lois, et sont l'une et l'autre directement proportionnelles à la quantité Q d'électricité accumulée sur le condensateur et à sa tension E.

M. Masson s'est occupé aussi de l'influence du circuit qui établit la communication entre les armures du condensateur, sur l'intensité de la lumière de l'étincelle produite au point d'interruption. Ses résultats l'ont conduit à poser le principe suivant :

Les *lois des variations* de l'intensité lumineuse de l'étincelle sont indépendantes de la *résistance* du circuit; mais l'*intensité absolue* de la lumière est en raison inverse de la *résistance* du circuit métallique.

M. Masson a pratiqué deux et même trois interruptions dans le circuit du condensateur; tantôt les conducteurs intermédiaires étaient isolés, tantôt ils communiquaient avec le sol. Au premier point d'interruption, l'intensité de l'étincelle est restée proportionnelle au carré de la première distance explosive; à un point d'interruption quelconque, l'intensité de l'étincelle a été constamment proportionnelle au produit de la première distance explosive par la distance explosive correspondante au point considéré.

Arc voltaïque. — MM. L. Foucault et Fizeau (1) ont comparé l'intensité de la lumière émise par les charbons

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1844, t. XI, p. 370.

polaires de la pile à l'intensité de la lumière solaire et de la lumière produite par la chaux placée dans la flamme d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. Le procédé photométrique est fondé sur les propriétés chimiques de la lumière. L'image était reçue, au foyer d'une lentille achromatique, sur une plaque recouverte d'une couche *sensible* d'iodure d'argent ; le temps d'exposition de la plaque variait d'une expérience à l'autre, et était prolongé jusqu'à ce que la couche sensible eût éprouvé un degré d'altération déterminé et toujours le même. De la connaissance des temps d'exposition, des distances focales et des rayons d'ouverture des lentilles, il était facile de déduire les rapports d'intensité des sources lumineuses en expérience. D'une manière générale, ce procédé photométrique ne doit être considéré que comme donnant la mesure de l'*intensité chimique* des sources lumineuses. Cependant, dans le cas où les radiations lumineuses émanent de sources très différentes, mais qui *produisent de la lumière blanche*, MM. L. Foucault et Fizeau se sont assurés, par des mesures directes, que les intensités *optiques* et les intensités *chimiques* sont dans le même rapport.

Une étude préalable leur avait montré que le pôle positif de la pile l'emporte toujours en surface lumineuse et même en intensité sur le pôle négatif. L'arc qui unit les deux électrodes émet une lumière d'un bleu pourpré dont l'intensité optique est évidemment inférieure à celle des pôles. Le maximum d'intensité se rencontre toujours sur le pôle positif qui présente une surface circulaire de 2 à 3 millimètres de diamètre, *douée d'un éclat à peu près uniforme*. C'est cette dernière surface que MM. L. Foucault

et Fizeau ont constamment prise pour source lumineuse, dans leurs expériences sur l'intensité de la lumière émise par les charbons polaires de la pile. D'après ce que nous avons dit plus haut, il est permis d'admettre que leurs déterminations, bien que fondées sur la mesure des intensités chimiques, peuvent être étendues aux intensités optiques des trois sources lumineuses comparées.

Les résultats suivants sont fournis par des expériences dans lesquelles on avait pris, pour pôles, des baguettes de charbon provenant de la distillation de la houille. L'électromoteur était une pile de Bunsen à zinc intérieur. Les cylindres de charbon, d'un diamètre intérieur de $5^{c},5$, plongeaient dans l'acide de 9 centimètres; l'acide nitrique employé marquait 20 degrés à l'aréomètre, et l'acide sulfurique 15 degrés. Tantôt les couples étaient associés en une série unique fournissant un courant à très haute tension; tantôt les couples étaient disposés en plusieurs séries parallèles et réunies pôle à pôle, de manière à constituer des batteries voltaïques à grandes surfaces.

Intensité de la lumière solaire		100
Intensité de la lumière émise par le pôle positif.	avec 46 couples en série, *au début*	23,5
	avec 80 couples en série, *au début*	23,8
	avec 80 couples en série, la pile fonctionnant depuis *trois heures*	15,9
	avec *trois* séries de 46 couples réunies pôle à pôle, la pile fonctionnant depuis *une* heure	38,5
	avec 40 couples en série, la pile fonctionnant depuis *deux* heures	13,6
	avec *deux* séries de 40 couples réunies pôle à pôle, la pile fonctionnant depuis *deux* heures	23,8
Intensité de la lumière émise par la chaux placée dans la flamme du chalumeau à gaz		0,685

De ces déterminations faites avec beaucoup de soin découlent des conséquences importantes.

1° Par son intensité, la lumière émise par le charbon servant de pôle positif à la pile est très supérieure à celle que fournit la chaux plongée dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, et se rapproche d'une manière remarquable de la lumière solaire.

2° Du moment que la tension de la pile est suffisante pour déterminer et entretenir un flux continu d'électricité d'un pôle à l'autre, l'augmentation du nombre des couples n'influe que très peu sur l'intensité de la lumière émise.

3° Au contraire, du moment que la tension est suffisante pour que l'arc voltaïque s'établisse, l'intensité de la lumière émise augmente très rapidement avec la surface des couples.

Quand on veut produire de beaux effets lumineux et qu'on peut disposer d'un très grand nombre de couples, il vaut donc mieux en former une batterie composée de plusieurs séries parallèles, réunies pôle à pôle et composées chacune de 40 à 50 éléments, que de les associer en une série *unique* à très haute tension.

Cette dernière conclusion est parfaitement d'accord avec ce que nous avons déjà dit (pages 110 et 113) de la disposition à adopter dans l'association des couples voltaïques suivant la nature des effets à obtenir.

M. Despretz (1) a publié un travail intéressant sur la

(1) *Compt. rend. de l'Acad. des sc.*, 1850, t. XXX, p. 367; — t. XXXI, p. 418.

lumière électrique; il a étudié avec beaucoup de soin l'influence du mode d'association des couples sur la longueur et sur l'intensité lumineuse de l'arc voltaïque. Comme celles de MM. L. Foucault et Fizeau, ses recherches confirment l'exactitude des indications déduites de la théorie de la pile. En effet, les expériences très nombreuses et très variées de M. Despretz démontrent que :

1° Quand les couples sont associés en une série *unique*, la *longueur* de l'arc augmente plus rapidement que le nombre des éléments voltaïques.

2° Quand les couples sont rangés en séries égales et parallèles réunies pôle à pôle, la *longueur* de l'arc augmente beaucoup moins rapidement que le nombre des éléments voltaïques.

3° Si les couples sont associés en une série *unique*, l'intensité lumineuse de l'arc n'augmente pas d'une manière très notable quand on multiplie le nombre des éléments voltaïques.

4° Quand les couples sont rangés en séries égales et parallèles réunies pôle à pôle, l'intensité lumineuse de l'arc augmente très rapidement avec la surface.

§ V. — Composition de la lumière électrique.

Wollaston tenta l'analyse de la lumière électrique; mais ce sont les travaux de Fraünofer (1) qui ont fourni les premières notions précises sur la composition de la radiation lumineuse de l'électricité. Le célèbre opticien allemand, après avoir découvert les *raies noires* du spectre

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 1817, t. VI, p. 21.

solaire, constata, dans le spectre de la lumière fournie par la combustion de l'alcool, de l'huile, et en général par toutes les flammes, l'existence d'une *raie brillante* à bords tranchés, *constamment* placée entre la couleur rouge et la couleur jaune. Il soumit ensuite la lumière électrique à la même analyse. Nous rapportons textuellement la manière dont il rendit compte des résultats de ses recherches.

« La lumière électrique, dit-il, diffère d'une manière » frappante de la lumière solaire et de celle du feu, sous » le rapport des lignes et des bandes du spectre coloré. » On distingue, dans le spectre de cette lumière, *plusieurs* » *lignes* en partie *très claires*, dont une, qui se trouve » dans le *vert*, est d'une clarté presque brillante en com- » paraison du reste du spectre. Une autre ligne un peu » moins lumineuse se trouve dans l'*orangé*. Elle paraît » avoir la même couleur que la ligne claire du spectre de » la lampe ; mais, si l'on mesure son angle de réfraction, » on trouve que cette lumière est beaucoup plus réfractée » et à peu près autant que les rayons jaunes de la lu- » mière de la lampe. Vers l'extrémité du spectre on » remarque, dans le *rouge*, une ligne qui n'est pas très » claire ; sa lumière, autant que j'ai pu m'en assurer, est » aussi fortement réfractée que celle de la ligne claire de » la lumière de la lampe. Dans le reste du spectre on peut » encore distinguer très facilement *quatre lignes bien* » *claires*. »

M. Wheatstone reprit beaucoup plus tard (1) ces expé-

(1) *Association britannique pour l'avancement des sciences*, 5e réunion. Dublin, 1831.

riences; il vérifia l'exactitude des observations de Fraünofer, et constata en outre que le nombre, la couleur et la position des lignes brillantes du spectre de la lumière électrique dépendent de la nature des conducteurs employés comme pôles. Les résultats généraux furent les mêmes avec l'arc voltaïque, les étincelles de la machine électrique et les décharges d'un appareil électro-magnétique. Les phénomènes restèrent de même nature, quand la lumière électrique fut successivement observée dans l'air, dans l'oxygène et dans les divers gaz à la pression ordinaire, dans l'air raréfié du récipient de la machine pneumatique, et même dans la chambre barométrique. Ces expériences prouvent, comme du reste on le savait déjà, que la lumière électrique n'est pas le résultat d'une combustion.

Nous devons à **M. L. Foucault** (1) un travail important sur la composition de la lumière de l'arc voltaïque. Au milieu des raies lumineuses, très nombreuses et irrégulièrement groupées, qui sillonnent le spectre de l'arc du charbon, il s'est surtout occupé d'une double raie très brillante située à la limite de l'orangé et du jaune. Il a fait tomber sur l'arc voltaïque une image solaire formée par une lentille convergente, et a ainsi superposé le spectre électrique et le spectre solaire en les faisant déborder l'un sur l'autre. L'image était composée de trois parties : la moyenne contenait à la fois les deux spectres exactement superposés; des deux extrêmes, l'une était formée par le spectre solaire *seul*, et l'autre par le spectre électrique *seul*. L'étude de

(1) *Biblioth. univers. de Genève*, 1849, t. X, p. 222.

cette image lui a permis de constater les faits suivants:

L'arc électrique est très transparent et ne porte à la lumière solaire qu'une ombre légère. — La double raie brillante située à la limite de l'orangé et du jaune dans le spectre électrique coïncide exactement avec la double raie noire D du spectre solaire. — La raie D conserve sa *teinte obscure habituelle* dans la portion de l'image constituée par le spectre solaire *seul*, se *creuse* et apparaît *plus noire qu'à l'ordinaire* dans la portion où les deux spectres sont superposés, enfin se détache *en clair* dans la portion correspondante au spectre électrique *seul*. D'ailleurs la coïncidence de ces trois parties de la raie D reste parfaite. Il résulte de cette observation que l'arc, en même temps qu'il *émet* les rayons D pour son propre compte, a la propriété d'*absorber* ces mêmes rayons D de la lumière solaire.

M. Draper avait démontré que le spectre de la lumière fournie par un fil de platine rougi par le passage d'un courant est dépourvu de toute espèce de raies. M. L. Foucault a retrouvé cette absence de raies dans le spectre de la lumière émise par les charbons polaires incandescents. Agissant toujours par voie de superposition, il s'est assuré en outre que l'arc absorbe les rayons D de la lumière de ces charbons incandescents.

La même méthode de superposition a permis à M. L. Foucault de constater que la raie brillante D du spectre de la lumière électrique coïncide exactement avec la raie brillante signalée par Fraünofer dans le spectre de la flamme de la lampe.

M. L. Foucault a aussi étudié la composition de la lumière

des arcs fournis par les métaux employés comme surfaces polaires, et a fait concourir ces différents arcs avec la lumière solaire. Les faits qu'il a constatés dans ces circonstances sont d'une haute importance. — Dans les spectres de tous ces arcs, il a retrouvé, à la même place et presque constamment, la raie brillante D de l'arc du charbon. — Les raies brillantes des spectres électriques, variables dans leur nombre, leur position et leur couleur avec la nature des surfaces polaires, se détachent sur le fond relativement uniforme du spectre solaire. — Enfin, malgré l'apparence de leur disposition fortuite, les raies brillantes des divers spectres électriques possèdent toutes la nuance que leur assigne leur réfrangibilité ; plusieurs de ces raies électriques ont une intensité absolue énormément supérieure à celle du rayon solaire correspondant.

Dans son mémoire, M. L. Foucault a signalé d'une manière spéciale, dans l'arc de l'argent, l'existence d'une raie *verte* d'un éclat éblouissant. Cette belle raie, *ingrossissable* par les prismes, est une véritable source de lumière simple.

M. Despretz (1) a constaté que la position des raies brillantes du spectre de l'arc voltaïque est complétement indépendante du nombre et de l'arrangement des couples dont se compose la pile employée.

Dans ses belles et importantes recherches de photométrie électrique, M. Masson a étudié avec beaucoup de soin la composition de la lumière fournie par les diverses

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1850, t. XXXI, p. 418.

sources d'électricité; il a successivement opéré sur les étincelles des condensateurs, les arcs voltaïques, et les décharges des appareils d'induction. Nous ne pouvons pas entrer ici dans le détail de ses expériences; nous devons nous contenter de rapporter les principaux résultats de son travail.

Etincelles des condensateurs. — Le spectre de l'étincelle électrique est sillonné de raies brillantes dont la couleur est celle que leur assigne leur réfrangibilité. Le nombre et la position de ces raies sont indépendants de l'intensité de l'étincelle qui n'a d'influence que sur leur éclat.

Lorsque les surfaces polaires changent de nature, les caractères du spectre de l'étincelle sont altérés; les raies ne sont plus les mêmes. Ainsi :

Avec des pôles de charbon, les raies brillantes sont nombreuses et très déliées. Le violet a très peu d'intensité, il est parsemé de raies brillantes très fines et qui, vers la limite du spectre, paraissent séparées par des intervalles obscurs.

Avec des pôles de zinc, le spectre est caractérisé par un vert-pomme très prononcé.

Avec des pôles d'argent, le spectre est remarquable par l'intensité du vert, et par plusieurs raies de cette couleur d'une grande beauté.

Avec des pôles d'or, le spectre contient beaucoup de jaune, et des raies violettes très remarquables.

Avec des pôles de cuivre, le spectre est caractérisé par de belles raies vertes, par de nombreuses raies bleues, et de belles raies violettes.

Avec des pôles de cadmium (Figure 441), le spectre est très beau, et remarquable par de brillantes raies vertes et bleues.

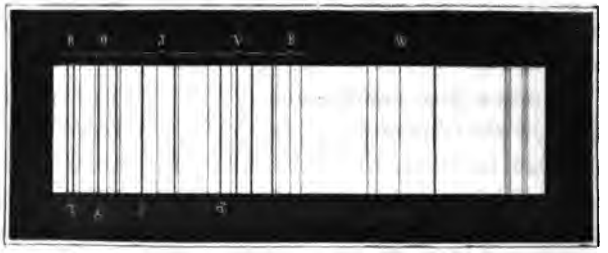


Fig. 441.

Avec des pôles d'antimoine (Fig. 442), le spectre est sillonné par des raies très brillantes, beaucoup plus nombreuses que dans les spectres des autres métaux.

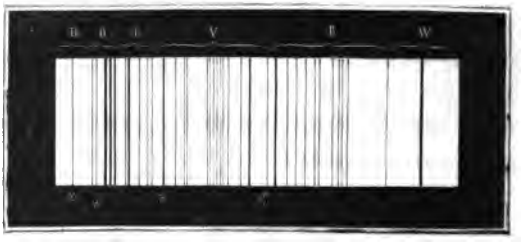


Fig. 442.

Avec des pôles de plomb, le spectre est remarquable par l'étendue du violet, et par les raies brillantes de cette couleur.

L'étain, le fer, le platine, employés comme pôles, four-

nissent des spectres sillonnés de raies brillantes qui ne présentent rien de bien remarquable.

Avec des pôles de bismuth (Fig. 443), le vert est traversé par une multitude de raies très brillantes.

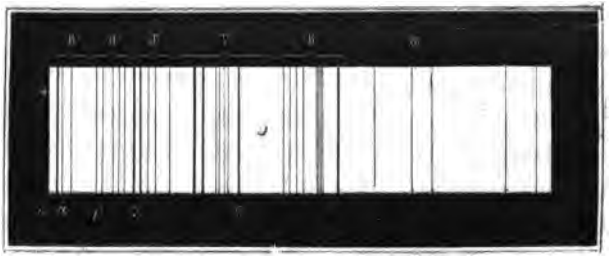


Fig. 443.

Indépendamment des raies particulières qui les caractérisent, tous ces spectres contiennent un certain nombre de raies qui leur sont *communes*, et dont l'existence est complétement indépendante de la nature des pôles. Dans les Figures 441, 442, 443, ces raies brillantes *communes* à tous les spectres sont indiquées par les lettres α, β, γ, δ.

Lorsque l'étincelle est produite dans un espace plein d'air raréfié, elle tend à prendre une couleur rouge pourpre. Dans cette circonstance, pour une même distance explosive, l'intensité des couleurs du spectre et des raies brillantes diminue à mesure que la densité du gaz devient plus faible, mais la position des raies ne change pas.

Dans l'hydrogène, à la pression ordinaire, l'étincelle a aussi une couleur rouge pourpre ; le spectre revêt les mêmes apparences que dans l'air raréfié, et la position des raies brillantes reste toujours la même.

Arc voltaïque. — Le spectre de l'arc voltaïque présente la même composition que celui de l'étincelle du condensateur. Quand on fait varier la nature des pôles, on retrouve les principales raies lumineuses que nous avons déjà signalées avec leurs positions et leurs teintes caractéristiques. Les spectres des divers arcs contiennent aussi les raies brillantes α, β, γ, δ, *communes* aux spectres des étincelles du condensateur.

M. Masson a vérifié l'exactitude de ce que MM. Draper et L. Foucault avaient déjà dit relativement à l'absence de toute raie dans le spectre de la lumière émise par le platine rougi par le passage d'un courant, et par les charbons polaires incandescents; ce fait paraît devoir être généralisé, et étendu aux radiations lumineuses de tous les corps *solides* incandescents.

M. Masson s'est assuré encore que le spectre des étincelles produites dans un *liquide*, soit par un condensateur, soit par une pile à haute tension, ne présente pas de *raie brillante*. Cependant, dans un cas où le liquide était de l'alcool et où il avait employé des boules de laiton pour pôles, le spectre présenta de *magnifiques raies brillantes;* mais les boules polaires avaient perdu le *tiers* de leur poids, le liquide tenait en suspension une matière noire qui était sans doute de l'oxyde ou du métal très divisé. Il y avait donc eu transport de matière conductrice, et un arc véritable s'était établi d'un pôle à l'autre. M. Masson substitua du charbon au métal; le liquide resta parfaitement transparent, il n'y eut pas de matière transportée, l'arc ne s'établit pas, et la lumière électrique fournit un spectre sans *raies brillantes*.

Décharges de l'appareil d'induction avec condensateur annexé au circuit induit. — Quelle que soit la nature des pôles, le spectre des décharges de l'appareil d'induction a la même composition que celui des étincelles d'un simple condensateur et des arcs voltaïques. M. Masson a constaté, en outre, que la nature des gaz et leur degré de raréfaction n'exercent d'influence que sur l'intensité du phénomène lumineux ; la couleur et la position des raies brillantes du spectre des décharges d'induction restent toujours les mêmes que dans l'air à la pression ordinaire. Ajoutons enfin que les raies *communes* α, β, γ, δ, se retrouvent toujours dans le spectre des décharges d'induction, et à la même place que dans les spectres des étincelles du condensateur et des arcs voltaïques.

En résumé, l'ensemble de tous ces faits nous permet d'établir avec certitude que la composition des spectres électriques est, pour une même substance employée comme pôles, indépendante de la nature et de l'intensité de la source électrique, de la nature et de la densité du milieu gazeux au sein duquel se produit le phénomène lumineux.

D'autre part, toutes les observations s'accordent pour montrer que la composition de la lumière électrique dépend de la nature des surfaces polaires ; nous avons vu, en effet, que chaque substance employée comme pôles fournit son spectre propre, caractérisé par la couleur et la position des raies brillantes dont il est sillonné.

Il est donc incontestable que ces raies brillantes sont les radiations des particules matérielles arrachées par l'électricité, et entraînées à l'état d'incandescence à travers l 'espace qui sépare les surfaces polaires.

Cependant M. L. Foucault a prouvé que la double raie brillante D se retrouve, constamment et à la même place, dans le spectre de tous les arcs voltaïques ; de son côté, M. Masson a signalé l'existence de quatre raies brillantes qui sont *communes* à tous les spectres électriques. Il y a donc des raies lumineuses qui, par leur couleur et leur position dans le spectre, restent complétement indépendantes de la nature de la source électrique et des surfaces polaires employées ; rappelons-nous en outre que, dans es expériences de Davy (page 488), le passage de la décharge électrique à travers une chambre barométrique refroidie à 29° au-dessous de *zéro*, déterminait la manifestation de phénomènes lumineux appréciables. En présence de ces faits bien constatés, il est au moins permis de se demander si le flux électrique de l'étincelle et de l'arc n'est pas aussi, par lui-même, une véritable source de lumière ; si, en d'autres termes, le spectre d'un arc ou d'une étincelle ne serait pas constitué par la superposition de deux images, dont l'une serait le *spectre propre* du flux d'électricité, et l'autre le spectre de l'atmosphère des particules incandescentes incessamment transportées d'un pôle à l'autre.

QUATRIÈME SECTION.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Il existe entre les étincelles des machines électriques et les éclairs échangés par les nuées orageuses une analogie qui, de bonne heure, fut saisie et signalée par les physiciens. A mesure que les effets de la décharge électrique furent mieux connus, les observateurs s'occupèrent avec plus de soin de l'étude des orages ; les points de ressemblance se multiplièrent entre ces deux ordres de phénomènes. Vers la fin de la première moitié du XVIIIe siècle, l'idée de l'identité de la matière de la foudre et de l'électricité était très répandue et très en faveur. Cependant personne encore n'avait pensé à en appeler à l'expérience directe pour vider définitivement cette grande question.

Le 7 novembre 1749 (1), Franklin écrivait sur son livre de laboratoire :

« Propriétés communes au fluide électrique et à la » foudre : — 1° de rendre de la lumière ; — 2° la couleur » de cette lumière ; — 3° la direction en zigzag ; — 4° la » rapidité du mouvement ; — 5° sa facilité à se laisser » conduire par les métaux ; — 6° le bruit, ou craque-

(1) *Œuvres de Franklin*, traduction de Barbeu-Dubourg. Paris, 1773, t. I, p. 185.

» ment dans l'explosion ; — 7° de subsister dans l'eau » ou dans la glace ; — 8° de déchirer les corps au travers » desquels il passe ; — 9° de tuer des animaux ; — 10° de » fondre les métaux ; — 11° d'allumer les substances in- » flammables ; — 12° l'odeur sulfureuse. »

Jusqu'ici cette note n'est qu'un résumé net et succinct des faits signalés par beaucoup de physiciens de cette époque. Mais Franklin ne s'arrête pas là ; il sent la nécessité d'une expérience décisive, en comprend la possibilité, et ajoute :

« Le fluide électrique est attiré par les pointes. — Nous » ne savons pas si la foudre a cette propriété. — Mais » puisque ces deux substances conviennent en tous les » points dans lesquels on a pu les comparer jusqu'à » présent, n'est-il pas probable qu'elles conviennent » également en celui-ci? — *Il serait à propos d'en faire* » *l'expérience.* »

Quelques mois après, Franklin développait complétement ses idées sur l'origine de la foudre, dans deux lettres adressées à P. Collinson (1). Il était tellement convaincu de l'exactitude de ses opinions sur la nature des éclairs et du tonnerre, qu'il indiquait (2) un moyen de préserver les églises, les maisons, les vaisseaux, etc., des coups de foudre. Cette partie de sa lettre est une description succincte du paratonnerre tel qu'on le construit de nos jours, avec l'indication précise des conditions essentielles à remplir dans l'établissement de cet appareil. Mais, avant tout,

(1) *Loc. cit.*, p. 38 à 80.
(2) *Loc. cit.*, p. 62.

Franklin voulait qu'on s'assurât directement si les nuées orageuses sont électrisées ou non; il exposait, d'une manière complète et avec tous les détails convenables, le procédé expérimental qui devait servir à vider cette grande question.

Ces propositions de Franklin furent assez mal accueillies en Angleterre; personne ne fut tenté de faire l'expérience qu'il avait indiquée. Lui cependant continuait ses travaux, et découvrait entre l'électricité et la foudre un rapport nouveau et bien important. Le vaisseau du capitaine Waddel avait été frappé d'un coup de foudre, et les aiguilles de ses boussoles avaient été toutes mises hors de service; les unes avaient été complétement désaimantées, les autres avaient eu leurs pôles renversés. — Dans une lettre du 29 juin 1751 (1), Franklin annonce que, dans le cours de ses expériences, il a souvent, par le moyen de l'électricité, *renversé les pôles* des aiguilles aimantées, et même *aimanté* des aiguilles à l'état neutre.

Enfin, le 10 mai 1752, Dalibard réalisa à Marly-la-Ville la célèbre expérience proposée par Franklin dans ses lettres à P. Collinson. Dans un jardin situé au milieu d'une plaine dont le sol est fort élevé, il fixa solidement, sur un support isolé, une barre de fer, ronde, de 27 millimètres de diamètre à la base, de 13 mètres de hauteur, et terminée par une pointe d'acier trempé et bruni. Au moment où des nuées orageuses passèrent au zénith, la barre s'électrisa assez fortement pour donner de longues et brillantes étincelles. L'état de tension électrique des

(1) *Loc. cit.*, p. 84.

nuages chargés de la foudre était donc définitivement démontré. Cette expérience fut répétée de toutes parts, et partout avec le même succès.

Dans le courant de la même année, Franklin employa le cerf-volant pour recueillir l'électricité des nuages. Il donne lui-même la description de son appareil dans une lettre adressée le 19 octobre 1752 à P. Collinson (1). Sous cette nouvelle forme, l'expérience de Franklin fut exécutée en France par M. de Romas, assesseur au présidial de Nérac (2). Lorsque, en mai 1753, le physicien de Nérac lança son premier cerf-volant électrique, il ignorait certainement que Franklin l'avait devancé à Philadelphie. Mais, si l'on ne peut pas réclamer la priorité de cette expérience en faveur de M. de Romas, il est juste cependant de faire observer que, soit dans la construction de ses appareils, soit dans les précautions dont il s'entoura, il fit preuve de connaissances très étendues en électricité. Les recherches de M. de Romas se recommandent encore par la grandeur des effets qu'il obtint : le 16 août 1757, son cerf-volant, lancé par un temps orageux, fournissait des lames de feu de 29 à 33 décimètres de longueur et de 27 millimètres de grosseur, qui faisaient autant ou plus de bruit que des coups de pistolet.

Quoique Franklin n'ait pas fait lui-même la première expérience avec la barre électrique, c'est à lui que revient la gloire de la démonstration de la présence de l'électri-

(1) *Loc. cit.*, p. 114.

(2) *Mémoires de mathématique et de physique*, présentés à l'Académie royale des sciences par divers savants, etc., t. II, p. 393; t. IV, p. 514.

cité libre dans les nuages chargés de la foudre. Dalibard, à Marly-la-Ville, n'a fait, de son propre aveu, que réaliser le programme tracé par le physicien de Philadelphie dans ses lettres à P. Collinson. M. de Romas, dans sa lettre à l'auteur du *Journal encyclopédique*, dit lui-même : « Si » l'aiguille de M. Franklin n'eût pas réussi, peut-être » n'aurais-je jamais eu l'idée du cerf-volant. — De là, je » dois reconnaître que, dans ce sens, j'ai travaillé sur le » propre fonds de M. Franklin. » Quant à l'expérience du cerf-volant, il est surabondamment démontré que Franklin l'avait faite à Philadelphie huit mois au moins avant qu'elle eût été tentée en France.

Pour constater la présence de l'électricité dans l'atmosphère, et déterminer son mode de distribution, on emploie des électroscopes ou des galvanomètres, qui ne diffèrent des autres appareils de ce genre que par certaines dispositions très simples. De Saussure se servait, dans ses excursions sur les montagnes, d'un petit électroscope à balles de sureau (Fig. 444).

La partie supérieure de la cloche de verre est recouverte d'un vernis isolant ; sa section transversale est rectangulaire. Une tige métallique passe à travers la tubulure de la cloche : sa partie inférieure sert à suspendre deux petites balles de sureau, au moyen de deux fils de platine très fins et très mobiles ; sa partie supérieure est armée d'un petit chapeau de laiton D, destiné à mettre l'appareil à l'abri de la pluie. Enfin, ce chapeau supporte une tige métallique T, terminée en pointe, de 60 centimètres de hauteur, et qui, pour plus de commodité, est généralement divisée en trois parties. Sur une paroi de la cloche est

tracé un arc gradué dont le centre est à la hauteur du point de suspension des fils de platine, et qui permet de mesurer l'angle d'écartement des deux petits pendules.

De Saussure construisait expérimentalement la table

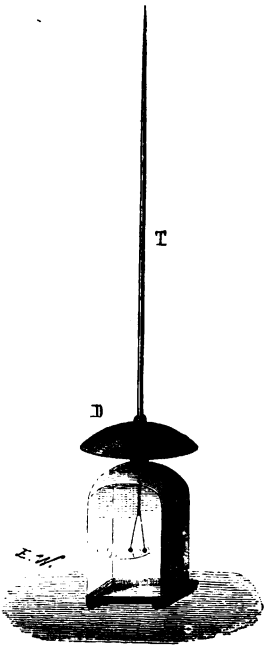


Fig. 111.

de graduation de son appareil. A cet effet, il prenait deux électroscopes parfaitement semblables, et en électrisait un. Il notait l'angle d'écartement des pendules; puis il mettait les deux appareils en contact, enlevait ainsi à

l'électroscope électrisé la moitié de sa charge, et observait de nouveau l'angle d'écartement. Une suite d'opérations semblables lui permettait de déterminer les rapports des charges correspondantes aux divers écartements angulaires des petits pendules.

Supposons qu'on présente un corps électrisé *positivement* à la pointe de cet électromètre. L'appareil s'électrise par influence ; le fluide *négatif* s'écoule par la pointe et va neutraliser le corps inducteur, tandis que le fluide *positif* reste répandu à l'état de liberté sur la tige et les petits pendules. La tension électrique permanente communiquée par influence à cet électroscope armé d'une pointe est donc de *même signe* que celle du corps inducteur lui-même. La détermination de l'angle d'écartement des pendules et de la nature du fluide qui les fait diverger fournit, dans chaque cas particulier, des notions approximatives sur la tension électrique du corps inducteur, et permet de déterminer exactement le signe de sa charge.

Volta remplaçait les pendules métalliques de de Saussure par deux longues pailles très minces, très sèches et très mobiles autour de leurs extrémités supérieures. Dans le but de rendre son appareil plus sensible, Volta plaçait à l'extrémité de la tige un corps brûlant avec flamme, ou tout simplement un morceau d'amadou en ignition. En effet, dans beaucoup de circonstances où l'électroscope atmosphérique ne fournit aucune trace sensible d'électrisation, l'expérience prouve qu'il suffit de placer un corps en combustion autour de la pointe de l'appareil, pour que les pailles divergent. Volta employait ordinairement une mèche de coton soufrée, engagée dans une spirale mé-

tallique qui se fixait elle-même à la partie supérieure de la tige. Ce procédé expérimental fut généralement adopté en Italie, où il est encore employé.

Le rôle joué, en cas pareil, par le corps en combustion a été étudié avec beaucoup de soin par M. Riess (1). Nous devons nous contenter de donner ici les principaux résultats de ses expériences.

1° Lorsqu'un corps brûlant avec flamme fournit des vapeurs *conductrices* de l'électricité, il s'échappe de la flamme un courant dense de *vapeurs* qui s'élèvent dans l'air sous forme d'une colonne *conductrice*. Mais bientôt cette colonne se subdivise en un grand nombre de filets distincts qui vont s'amincissant de plus en plus, et se dissipent enfin dans l'air. Il part donc de cette masse *conductrice* de vapeurs, *au dedans et au-dessus de la flamme*, des filets également *conducteurs*, séparés par les gaz non conducteurs qui se forment et par l'air chaud également isolant, et terminés nécessairement par des pointes. Par conséquent, la flamme doit être considérée comme un *bon conducteur* de l'électricité, garni de nombreuses pointes très allongées, excessivement aiguës, et qui pénètrent de tous côtés dans l'atmosphère. On comprend ainsi facilement comment un corps électrisé placé au-dessus et même à une assez grande distance de la flamme d'une lampe à alcool retombe très rapidement à l'état neutre. Un effet du même genre serait obtenu avec la lampe de Davy qui ne donne pas *de flamme*, mais qui fournit des vapeurs abondantes et *conductrices* de l'électricité.

(1) *Archives de l'électricité*, 1843, t. V, p. 91.

2° L'amadou en combustion ne fournit pas de flamme, et les vapeurs qui s'en échappent sont *isolantes*. Mais, pendant que s'effectue la combustion, il se forme incessamment à la surface de l'amadou des pointes *très délicées* qui permettent à l'électricité accumulée par influence de s'échapper dans l'atmosphère. Les mêmes effets s'observent avec les *mèches sèches*, les *pastilles* à brûler, et tous les corps conducteurs qui brûlent sans flamme et conservent leur état solide pendant la combustion. — Au contraire, les corps qui, comme le soufre, se liquéfient avant de brûler et ne fournissent que des vapeurs *isolantes*, n'exercent aucune influence sur les corps électrisés placés dans leur voisinage.

Ces résultats de M. Riess ne laissent aucun doute sur la véritable cause de la sensibilité des électroscopes atmosphériques, dont les tiges sont armées à leur partie supérieure d'un corps en combustion. Cependant, comme toute combustion s'accompagne d'un dégagement d'électricité, en se servant d'électroscopes de ce genre, on s'expose à recueillir sur l'appareil le fluide mis en liberté par la combustion elle-même, et à commettre des erreurs dans l'appréciation de la nature, et surtout de la tension de la charge électrique de l'atmosphère.

Dans les expériences très délicates, on peut se servir de l'électroscope à feuilles d'or surmonté d'une tige que, selon les circonstances, on termine par une pointe ou par une boule. La cloche de l'appareil porte une échelle graduée qui permet de mesurer l'angle d'écartement des feuilles d'or ; pour en déduire la tension de la charge, il faut construire à l'avance une table de graduation.

Peltier (1) a fait subir au diagomètre de Rousseau des modifications qui permettent de l'employer dans les recherches d'électricité atmosphérique. Cet électroscope (Fig. 445) est considéré, à juste titre, comme le meilleur appareil d'observation.

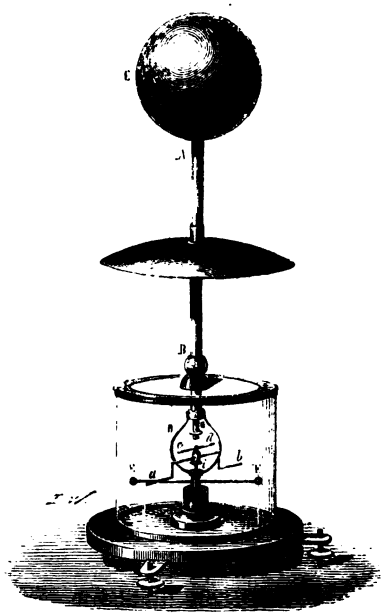


Fig. 445.

Sur le milieu d'une cage cylindrique de verre, s'élève une tige métallique armée de deux boules C, B. La boule

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1836, t. LXII, p. 422. — 3e série, 1842, t. IV, p. 385.

supérieure C est creuse ; son diamètre est d'*un* décimètre environ. La boule inférieure B est beaucoup plus petite, et appuie sur un gros tampon de gomme-laque à travers lequel la tige pénètre dans la cage de verre. Sur le milieu de sa longueur, la tige AB porte un chapeau métallique destiné à mettre l'appareil à l'abri de la pluie. A l'intérieur de la cage, la tige métallique AB communique avec un anneau de cuivre D, dont la partie inférieure est armée d'une pointe d'acier qui porte une chape métallique. Un fil de cuivre *ab* et une aiguille aimantée *cd* sont fixés à cette chape horizontalement et dans le même plan vertical. De cette manière, le fil *ab* et l'aiguille *cd* sont solidaires, et tendent toujours à revenir ensemble dans le plan du méridien magnétique, quand une cause quelconque les en a écartés. L'anneau D est soudé, à sa partie inférieure, avec une tige métallique engagée dans un gros tube de verre rempli de gomme-laque et encastré dans le support de bois. A cette tige verticale est fixée une grosse aiguille métallique et horizontale EF. De cette manière, la tige AB, les deux boules C, B, l'anneau D, l'aiguille EF, et le fil de cuivre *ab* sont reliés par des communications métalliques ; de plus, ces diverses pièces forment un ensemble parfaitement isolé. — La boule inférieure B, en tournant autour de la tige métallique, fait monter ou descendre le cylindre G. Quand l'appareil est au repos, on abaisse le cylindre G jusqu'à ce qu'il appuie sur la chape du fil *ab* ; quand l'appareil doit marcher, on rend au fil *ab* la liberté de se mouvoir, en relevant le cylindre G.

Quand on veut faire une observation, on commence par orienter l'appareil. A cet effet, on place l'aiguille EF

dans le plan du méridien magnétique, et l'on soulève le cylindre G. Le fil *ab*, entraîné par l'aiguille aimantée *cd*, vient se placer dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à EF, au-dessus et très près de cette aiguille.

Les choses étant ainsi disposées, présentons à la boule C un corps électrisé *positivement*. L'aiguille fixe EF et le fil *ab* s'électrisent positivement par influence, et se repoussent. Le fil *ab* s'écarte angulairement de l'aiguille EF jusqu'à ce que la répulsion de ces deux corps soit équilibrée par la force directrice de l'aiguille aimantée *cd*. — Deux cercles divisés, placés l'un sur le couvercle et l'autre sur le support de la cage de verre, permettent de mesurer l'angle d'écartement du fil *ab*, et d'éviter les erreurs de parallaxe. — Si l'on touche avec le doigt la tige AB, l'appareil prend une charge permanente *négative*.

On peut aussi remplacer la boule C par une pointe, et présenter à l'appareil un corps électrisé. Dans ce cas, l'électroscope prend, par influence, une charge permanente de *même signe* que celle du corps inducteur.

M. Quetelet, qui emploie l'appareil de Peltier dans ses observations d'électricité atmosphérique, construit expérimentalement la table de graduation de l'appareil par la méthode de de Saussure dont nous avons déjà parlé page 540.

Le galvanomètre est quelquefois employé dans les recherches d'électricité atmosphérique. Dans ce cas, les spires du fil métallique enroulé autour du cadre de l'appareil doivent être très soigneusement isolées les unes des autres. Une des extrémités du fil est mise en commu-

nication avec un conducteur profondément enfoncé dans la terre ; l'autre extrémité du fil terminée en pointe, est élevée dans l'atmosphère au moyen d'un support isolant. Toutes les fois qu'il existe une différence de tension entre l'état électrique de l'air et celui de la terre, il s'établit un courant à travers le fil du galvanomètre, et l'aiguille aimantée est déviée. Le sens et l'intensité du courant servent à déterminer le signe de la tension atmosphérique, et son excès sur la tension de la surface du globe. Ajoutons cependant qu'en raison de la quantité d'électricité nécessaire pour dévier l'aiguille aimantée, le galvanomètre est un appareil beaucoup moins sensible que l'électroscope.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Les premières observations d'électricité atmosphérique furent faites par les temps d'orage ; cependant l'expérience ne tarda pas à démontrer que, même par un temps parfaitement serein, l'atmosphère est toujours dans un état de tension électrique. Vers la fin de septembre 1752, Le Monnier fit, à Saint-Germain, une série de recherches intéressantes sur ce sujet (1). Les hautes barres métalliques, isolées et terminées en pointe, conseillées par Franklin, et les autres appareils fixes analogues, sont aujourd'hui généralement abandonnés et remplacés par des instruments mobiles. Les électroscopes armés de tiges dont on se sert ordinairement sont terminés, tantôt par

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1752, p. 233.

une boule, tantôt par une pointe; dans l'un et l'autre cas, ils se chargent par influence.

En général, un électroscope n'est influencé ni dans les lieux bas dominés par des arbres ou par des édifices, ni dans la cour ou l'intérieur d'une maison, ni dans les rues d'une ville. En rase campagne et même sur les hauts plateaux, c'est seulement à environ *un* mètre au-dessus du sol que les pailles d'un électroscope commencent à diverger; l'intensité de cette électrisation par influence augmente à mesure que l'appareil est porté dans des régions plus élevées. — L'aiguille d'un galvanomètre est déviée et accuse le passage d'un courant, lorsque le fil est disposé de manière que l'une de ses extrémités plongeant en terre, l'autre soit librement suspendue à une certaine hauteur. La terre et l'atmosphère se conduisent donc comme deux corps en présence dont les tensions électriques diffèrent par leur signe ou du moins par leur intensité.

Bien que l'air soit un mauvais conducteur, cependant les couches inférieures de l'atmosphère, toujours imprégnées d'humidité et en contact continuel avec les aspérités dont le sol est hérissé, ne peuvent pas conserver une tension différente de celle des couches superficielles de la terre. Ces circonstances expliquent pourquoi, dans les villes, les appareils doivent être élevés au-dessus des édifices pour donner des indications d'électricité libre, et pourquoi, même dans les plaines nues, c'est seulement à une certaine hauteur au-dessus du sol, variable avec l'état hygrométrique, que les électroscopes sont influencés.

Temps serein. — Par un temps serein, lorsque l'at-

mosphère est complétement dépouillée de nuages, un électroscope, armé d'une tige métallique pointue et élevé à une hauteur suffisante pour n'être dominé ni par les arbres ni par les édifices, se charge toujours d'électricité positive. Ce résultat indique que des deux fluides séparés par influence, le négatif s'est échappé par la pointe, et le positif est resté sur l'appareil. La tension électrique de l'air est donc positive. — Dans les mêmes circonstances, les indications du galvanomètre accusent le passage d'un courant dirigé de l'air à la terre. — Tous ces faits s'accordent pour démontrer que : *Par un temps serein l'atmosphère est positive.*

L'électricité libre de l'atmosphère réagit nécessairement par influence sur la terre elle-même. Il en résulte que, par un temps serein, la surface du sol et tous les corps qui s'y trouvent doivent être électrisés négativement. On doit à Volta une expérience ingénieuse qui met ce fait hors de contestation. — Sur un plateau métallique fixé à la tige d'un électroscope, il recevait les gouttelettes d'eau qui, sous forme de pluie très fine, s'échappaient d'une cascade ; l'appareil prenait une charge négative. Le courant d'eau de la cascade et la surface du sol étaient donc, eux aussi, électrisés négativement, car ces gouttelettes devaient être en équilibre électrique avec la masse d'eau qui les fournissait.

Par un temps sec et serein, il arrive souvent qu'un électroscope armé d'une pointe prend par influence une charge *négative* quand on l'approche d'un arbre élevé ou d'un grand édifice. Dans ce cas, la charge de l'appareil ne traduit pas l'influence de l'atmosphère, mais

celle de l'arbre ou de l'édifice dont la tension électrique est nécessairement de même signe que celle du sol, et, par conséquent, *négative*. Il faut, avec le plus grand soin, se mettre à l'abri de ces actions perturbatrices, sous peine de commettre de graves erreurs dans l'interprétation des indications des électroscopes atmosphériques.

Dans le cours de ses recherches météorologiques, de Saussure avait constaté que la tension électrique de l'atmosphère est d'autant plus intense, qu'on la mesure plus haut sur les flancs des montagnes. MM. Becquerel et Breschet ont fait, sur les plateaux du mont Saint-Bernard, des observations très intéressantes de tension électrique. Un long fil de soie recouvert de clinquant était étendu sur un morceau de taffetas gommé. Une extrémité de ce fil était fixée à une flèche armée d'une pointe métallique, l'autre extrémité portait un anneau dans lequel était engagée la tige d'un électroscope. Quand la flèche était lancée horizontalement à *un* mètre au-dessus du sol, les pailles de l'électroscope ne bougeaient pas ; le frottement de la flèche contre l'air ne développait donc pas de trace appréciable d'électricité. Mais, quand la flèche était lancée verticalement, les résultats étaient tout différents. A mesure que la flèche s'élevait dans l'atmosphère, la divergence des pailles devenait plus considérable, elle atteignait son *maximum* au moment où l'anneau, entraîné par le fil, abandonnait la tige de l'électroscope qui demeurait chargé de la même électricité que l'atmosphère. Des expériences de même genre ont été faites avec des cerfs-volants et des ballons captifs armés de pointes métalliques. Quel que soit le procédé expérimental adopté,

les résultats s'accordent pour établir que la tension de l'électricité libre des couches atmosphériques augmente avec leur élévation au-dessus de la surface du sol.

Cette distribution de l'électricité atmosphérique rend compte des résultats obtenus par MM. Gay-Lussac et Biot dans leur célèbre voyage aérostatique. Un fil métallique de 50 mètres de longueur était fixé par un bout à la nacelle, et pendait librement au-dessous, tendu par une boule de métal. Le bout *supérieur* du fil donna des signes évidents d'électrisation; sa tension augmenta avec l'élévation du ballon, mais elle se montra constamment *négative*. L'influence des couches atmosphériques situées au-dessous du fil attirait son électricité *négative* à l'extrémité inférieure; de leur côté, les couches atmosphériques situées au-dessus du fil attiraient l'électricité *négative* à son extrémité supérieure. Mais, puisque la tension des couches d'air augmente avec leur élévation au-dessus du sol, la résultante de ces deux actions opposées agissait nécessairement dans le sens de l'influence des couches supérieures, et la charge de l'extrémité *supérieure* du fil devait être *négative*. La tension électrique de la couche d'air dans laquelle le fil était plongé croissant elle-même avec la hauteur, l'influence de cette couche s'ajoutait à celle des couches supérieures pour rendre plus intense la tension *négative* du bout *supérieur* du fil.

Plaçons dans l'atmosphère un électroscope à feuilles d'or très sensible, et armé d'une tige terminée par une sphère. Supposons cet électroscope en équilibre avec l'air ambiant; ses feuilles sont verticales et collées l'une contre l'autre. — Fixons *horizontalement* un fil métallique à une

tige isolante, et portons-le parallèlement à lui-même, à 2 ou 3 mètres au-dessus de l'électroscope. Le fil se met nécessairement en équilibre avec les couches d'air qui l'entourent, et, par conséquent, prend une tension positive supérieure à celle de l'électroscope. Si nous descendons rapidement ce fil, et si nous le mettons en contact avec la boule de l'électroscope, les feuilles d'or s'électrisent *positivement* et divergent ; la charge *positive* de l'électroscope est évidemment cédée par le fil qui avait pris, dans les couches d'air supérieures, un excès d'électricité positive. L'électroscope étant en équilibre, abaissons horizontalement le fil au-dessous de l'appareil. Dans ce cas, le fil se met en équilibre avec les couches d'air dont la tension est inférieure à celle de l'électroscope. Aussi, quand le fil est rapidement ramené à la hauteur de la boule de l'appareil et mis en contact avec elle, les feuilles d'or divergent encore, mais leur charge est *négative*. Évidemment ici le fil a emprunté à l'électroscope une partie de son fluide positif et, par suite, une quantité correspondante de fluide *négatif* est restée libre sur l'appareil pour faire diverger les feuilles d'or. — Ces faits ont été signalés par Erman (1) dans un Mémoire très intéressant sur l'électricité atmosphérique.

Une autre observation d'Erman a suggéré à Peltier l'idée d'une nouvelle méthode d'observation de la tension électrique de l'atmosphère. Cette méthode a été adoptée par M. Quetelet. — Plaçons l'électroscope de Peltier (Fig. 446) sur un support élevé à une certaine hauteur

(1) *Journal de physique*, 1804, t. LIX, p. 98.

dans l'atmosphère. Afin d'éviter l'influence perturbatrice de la main qui, à cause de sa communication avec le sol, agirait comme corps négatif, touchons la partie inférieure de la tige, vers la boule B, avec un fil métallique. — L'électroscope est équilibré, le fil mobile *ab* se place dans

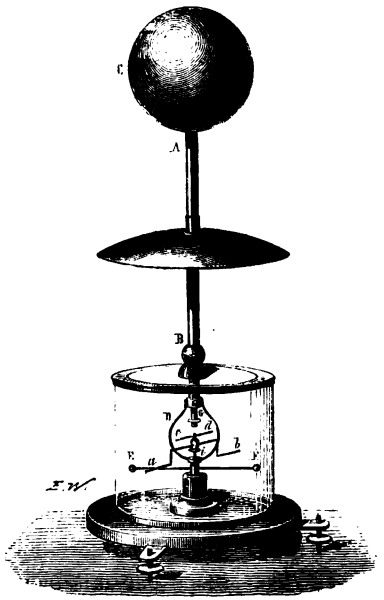


Fig. 446.

le méridien magnétique au-dessus de l'aiguille EF ; mais une certaine quantité d'électricité négative est retenue par influence dans la boule C. — Cela fait, élevons l'électroscope au-dessus du support : l'influence de l'atmosphère augmente ; une nouvelle quantité de fluide

neutre est décomposée; l'électricité *positive* est refoulée vers les parties inférieures de l'appareil, et le fil *ab* s'éloigne de l'aiguille EF. Redescendons alors l'électroscope sur son support; les fluides séparés par influence se recombinent, et, comme l'appareil n'a rien perdu ni rien gagné, le fil *ab* reprend sa position d'équilibre dans le plan du méridien magnétique. — Abaissons maintenant l'électroscope au-dessous du support: l'influence de l'atmosphère diminue; une partie de l'électricité *négative* retenue sur la boule C devient libre et se répand sur les diverses pièces de l'appareil; le fil *ab* et l'aiguille EF chargés *négativement* se repoussent. L'équilibre se rétablit et le fil *ab* reprend sa position dans le méridien magnétique, quand l'électroscope est de nouveau replacé sur son support.

Voici maintenant la méthode d'observation proposée par Peltier. — Sur une terrasse assez élevée pour dominer tous les corps environnants, on dispose deux tablettes de manière que l'une soit à *un* mètre et *demi* au-dessus de l'autre. On place l'électroscope sur la tablette supérieure et on l'oriente; puis on l'équilibre en touchant la partie inférieure de la tige avec un fil métallique. Cela fait, on descend l'électroscope sur la tablette inférieure, en ayant soin de maintenir l'aiguille EF dans le plan du méridien magnétique: le fil *ab* et l'aiguille EF se repoussent; on mesure l'angle d'écartement. La table de graduation donne l'intensité de la charge. Dans cette méthode, il faut évidemment donner à l'électricité atmosphérique un *signe contraire* à celui de la charge de l'appareil.

Des observations très multipliées démontrent que l'état

électrique des couches inférieures de l'atmosphère éprouve des variations, dont les unes correspondent aux diverses heures de la journée, les autres aux diverses saisons de l'année.

Par un temps serein et dans la période de vingt-quatre heures, la tension électrique de l'atmosphère présente deux *maxima* et deux *minima*. Le premier *maximum* s'observe quelque temps après le lever du soleil, et le second au commencement de la nuit, quelque temps après le coucher du soleil. Le premier *minimum* a lieu dans l'après-midi, à peu près au moment de la plus haute température atmosphérique ; le second *minimum* se prononce vers la fin de la nuit, quelque temps avant le lever du soleil. Les variations de l'état hygrométrique de l'atmosphère peuvent rendre raison de ces oscillations de la tension électrique de ses couches inférieures. En effet, un peu avant le lever du soleil, la précipitation de rosée est très intense, augmente la conductibilité des couches inférieures de l'atmosphère et favorise l'écoulement de leur électricité dans le sol ; l'électromètre doit accuser son *premier minimum*.— Plus tard, quand la terre est échauffée par les premiers rayons du soleil, les vapeurs qui s'élèvent rendent les couches supérieures conductrices ; leur électricité passe aux couches inférieures qui atteignent ainsi un *premier maximum* de tension. — Dans l'après-midi, à mesure que la température augmente, l'humidité de l'atmosphère diminue et les couches supérieures s'isolent des couches inférieures ; peu à peu l'électricité de ces couches inférieures s'épuise en s'écoulant dans le sol, et l'électromètre doit accuser alors un *second minimum* de tension. — Enfin au commence-

ment de la nuit, l'air se refroidit, devient plus humide et meilleur conducteur ; l'électricité des couches supérieures s'écoule vers les couches inférieures, et l'électromètre placé près du sol accuse un *second maximum* de tension.

La tension électrique de l'air varie aussi avec les saisons de l'année. Toutes les observations démontrent que, par un ciel serein, l'électricité atmosphérique atteint son *maximum* en janvier et son *minimum* en juin. La tension électrique suit donc, dans ses oscillations, une marche inverse de celle de la température atmosphérique.

Temps couvert. — Lorsque le ciel n'est pas serein, l'électricité des nuages agit par influence sur la terre et sur les corps placés à sa surface ; la tension accusée par les électroscopes est tantôt positive et tantôt négative. Les indications de ces appareils changent souvent de signe dans l'espace de vingt-quatre heures. Les mêmes variations s'observent pendant les jours pluvieux. L'électricité atmosphérique est quelquefois très considérable par les temps de brouillard et de neige. Du reste, l'électricité atmosphérique est, dans toutes les saisons de l'année, plus forte par un temps serein que par un temps couvert ; le mois de juin, qui correspond au *minimum* de tension électrique, fait seul exception à cette règle.

Lorsqu'on observe directement l'électricité des nuages au moyen de cerfs-volants et de ballons captifs, on trouve que les uns sont électrisés positivement ou les autres négativement. Il n'est pas difficile de se rendre compte de leur mode de formation.

Nuages positifs. — Au moment où, dans une atmosphère sereine et tranquille, la vapeur d'eau passe à l'état

vésiculaire et se condense sous forme de nuage, chaque vésicule emprunte son électricité à l'air au milieu duquel elle se produit, et représente un petit corps conducteur dont la tension est positive. Le nuage doit être considéré comme un corps résultant de la réunion d'une multitude de particules conductrices et électrisées ; ce nuage se conduit donc comme un véritable corps conducteur, et toute l'électricité libre des particules composantes s'accumule à sa surface. Si les vésicules sont très rapprochées les unes des autres, si le nuage est dense, toute l'électricité positive, primitivement répandue dans la masse d'air au sein de laquelle il s'est formé, se trouve transportée à sa surface, et la tension peut devenir très considérable.

Nuages négatifs. — Les nuages négatifs peuvent se former de plusieurs manières.

Les nuages ne sont pas tous à la même hauteur dans l'atmosphère. Mais nous savons que la tension électrique des couches d'air augmente avec leur élévation au-dessus du sol. Dès lors, les nuages supérieurs, dont la tension positive l'emporte sur celle des nuages inférieurs, agissent par influence sur ces derniers. Les nuages inférieurs perdent ainsi leur électricité positive, qui se dissipe peu à peu dans les couches d'air environnantes, et restent chargés d'électricité négative.

Sur les flancs des montagnes et sur les sommets des pics, il se forme des nuages qui restent quelque temps adhérents à la surface du sol, et sont soumis à l'influence de l'atmosphère positive. Quand un coup de vent les détache, ces nuages parasites sont entraînés, et restent chargés d'électricité négative.

Les masses de vapeurs vésiculaires qui se forment à la surface des fleuves, des mers, des lacs et des terres humides, sont aussi, par influence, chargées d'électricité négative. Ces brouillards se détachent du sol quelque temps après le lever du soleil, et s'élèvent lentement dans les couches supérieures de l'atmosphère où ils vont former des nuages négatifs. La tension négative des brouillards qui s'élèvent du fond des vallées des montagnes a été directement constatée par de Saussure, dans sa célèbre exploration des Alpes.

SOURCES DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

A diverses époques, les physiciens ont essayé de découvrir l'origine de ces grandes masses d'électricité libre qui existent dans l'atmosphère. Volta pensait que tout changement d'état s'accompagne d'un dégagement d'électricité; pour lui, l'évaporation était une source d'électricité, et l'état électrique de l'atmosphère était entretenu par les masses de vapeurs positives incessamment fournies par la surface des mers, des lacs, des cours d'eau et des continents. Plus tard (1), M. Pouillet reprit cette importante question de météorologie; il publia une série de recherches tendant à démontrer que l'électricité atmosphérique est fournie, d'une part par les phénomènes physico-chimiques de la végétation, d'autre part par les évaporations accompagnées de ségrégations chimiques

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 2e série, 1827, t. XXXV, p. 401, et t. XXXVI, p. 5.

qui se passent à la surface du globe. Nous ne dirons rien ici de la première source d'électricité signalée par M. Pouillet ; nous traiterons cette question avec tous les détails convenables, dans la seconde partie de notre travail, à propos du rôle que l'électricité joue, comme cause et comme effet, dans les phénomènes de la vie ; nous ne nous occuperons, pour le moment, que de l'évaporation considérée comme source de l'électricité atmosphérique.

Pour étudier le dégagement d'électricité pendant les évaporations, M. Pouillet projetait les liquides dans un creuset de platine chauffé au feu, et placé sur un des plateaux d'un électroscope condensateur ; l'autre plateau était mis en communication avec le sol. Le premier plateau servait à recueillir l'électricité du creuset ; le second plateau se chargeait par influence, et prenait le signe de l'électricité emportée par la vapeur d'eau. M. Pouillet conclut de ses expériences que :

1° L'évaporation de l'eau *pure* ne produit pas d'électricité.

2° L'évaporation d'une dissolution alcaline produit de l'électricité ; la vapeur d'eau, dans ce cas, est *négative*.

3° L'évaporation des dissolutions acides et salines produit de l'électricité ; la vapeur d'eau, dans ce cas, est *positive*.

S'appuyant sur ces résultats généraux de son travail, et partant de ce fait que les eaux répandues à la surface du globe tiennent toujours des substances étrangères en dissolution, M. Pouillet pense que l'évaporation des eaux des lacs, des rivières et des mers est une des sources les plus importantes de l'électricité atmosphérique.

Dans ces derniers temps (1), M. Gaugain a étudié avec beaucoup de soin le dégagement de l'électricité pendant l'évaporation des dissolutions salines. Il a montré que les signes d'électricité obtenus dans ce cas ne doivent être attribués ni au changement d'état de l'eau, ni à la ségrégation chimique, mais au frottement que les matières soumises à l'expérience exercent les unes contre les autres. Quand on projette une dissolution saline dans un creuset de platine rougi au feu, le liquide prend d'abord l'état sphéroïdal, et, tant que cet état persiste, l'électroscope ne donne aucun signe d'électrisation. Au moment où l'état sphéroïdal cesse, il se produit une *décrépitation* qui projette des gouttelettes de liquide contre les parois du creuset; alors l'électroscope se charge, et l'écartement des feuilles d'or devient de plus en plus considérable tant que dure la décrépitation. Mais, quand à la décrépitation succède l'évaporation tranquille du liquide, tout dégagement d'électricité cesse à l'instant même.

Lorsqu'on projette de l'eau pure dans un creuset rougi au feu, on n'obtient aucune trace d'électrisation; cela tient à ce que, au moment où cesse l'état sphéroïdal, l'eau n'éprouvant pas de *décrépitation*, il n'y a pas de gouttelettes liquides lancées contre les parois du creuset. M. Gaugain, en dirigeant un léger courant d'air sur l'eau pure globulisée, est parvenu à lui communiquer un mouvement gyratoire très prononcé, bientôt suivi d'une vive décrépitation; dans ce cas, le creuset s'est trouvé électrisé d'une manière très sensible.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1854, t. XXXVIII, p. 1012, et t. XXXIX, p. 231.

Enfin, M. Gaugain a suspendu au plateau d'un électroscope un fragment de chlorure de sodium calciné et fixé à l'extrémité d'un fil de platine. Après l'avoir fortement chauffé avec la lampe à alcool, il a fait tomber sur le sel, soit de l'eau pure, soit de l'eau contenant déjà du sel marin; il a obtenu ainsi un développement considérable d'électricité provenant évidemment du frottement de l'eau contre le sel.

Ces faits et les observations très intéressantes contenues dans le travail de M. Gaugain conduisent naturellement aux conclusions suivantes :

1° L'évaporation tranquille d'une dissolution quelconque ne produit aucune trace d'électricité libre.

2° L'électricité observée pendant l'évaporation des dissolutions salines dans un creuset rougi au feu provient du frottement de l'eau contre les dépôts qui tapissent l'intérieur du creuset.

Il n'est donc plus possible de considérer l'évaporation des eaux répandues à la surface du globe comme une des sources de l'électricité atmosphérique. Dans l'état actuel de la science, les causes qui produisent et maintiennent la tension positive de l'atmosphère sont complétement inconnues.

DE L'ORAGE.

Il n'entre pas dans notre sujet de faire un exposé complet de tous les météores dans lesquels l'électricité joue un rôle; nous ne devons nous occuper ici ni des signes précurseurs des orages, ni de la forme, ni de l'as-

pect et du mode de groupement des nuées orageuses, ni de l'origine de la grêle, ni de la constitution physique des trombes terrestres et marines dont les causes ont été si heureusement rapportées par Peltier aux attractions et répulsions électriques. Au milieu des grands phénomènes qui précèdent, accompagnent et suivent les orages, nous devons fixer exclusivement notre attention sur ceux qui peuvent servir à éclairer quelques points de la théorie physique de l'électricité.

Hauteur des nuages orageux. — Des faits rapportés dans la belle notice d'Arago sur le tonnerre (1), il résulte que la hauteur des nuées orageuses est très variable. Ainsi, d'une part, Bouguer dans les Cordillères, de Saussure dans les Alpes, MM. Peytier et Hossard dans les Pyrénées, ont observé des orages développés à 4868, à 4500 et 3200 mètres au-dessus du niveau de la mer, et, dans les plaines de la Sibérie, l'abbé Chappe a constaté que des nuées orageuses étaient à 3470 mètres de hauteur dans l'atmosphère; d'autre part, le même abbé Chappe a décrit des orages pendant lesquels les nuages n'étaient pas à plus de 214 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les observations contenues dans la Notice d'Arago tendent à prouver que les nuées orageuses peuvent, tant dans les pays de plaine que dans les montagnes, occuper toutes les régions de l'atmosphère situées entre ces deux limites extrêmes.

Éclairs. — L'éclair est un phénomène lumineux, une véritable étincelle, dont la cause est la décharge effectuée

(1) *Annuaire du Bureau des longitudes* pour l'an 1838.

entre deux nuages chargés d'électricités de noms contraires, ou entre un nuage et un objet quelconque situé à la surface de la terre. Dans ce dernier cas, l'éclair prend le nom de *coup de foudre*. Arago distingue et décrit trois classes d'éclairs.

Première classe. — Les éclairs de cette première classe consistent en *un trait*, en *un sillon de lumière, très resserré, très arrêté sur les bords*. Ces éclairs ressemblent exactement aux étincelles des machines électriques ; souvent ils sont blancs, on en voit de purpurins, de violacés, de bleuâtres. Ils ne se propagent pas en ligne droite, *ils serpentent, ils dessinent dans l'espace les zigzags les plus prononcés*. Quoiqu'on les voie quelquefois s'élancer d'un nuage à l'autre, ces éclairs s'établissent le plus souvent entre un nuage et une partie du sol ; ce sont les *éclairs fulgurants*, les *saëtte* des Italiens. A une certaine distance de la nue qui les fournit ils peuvent se bifurquer, et même, dans des cas qui paraissent très rares, se partager en trois éclairs distincts. La lumière qui accompagne le passage des décharges des nuages orageux à travers les couches de l'atmosphère doit être attribuée aux mêmes causes qui rendent lumineuses les décharges des batteries électriques. La science ne possède pas encore d'explication satisfaisante de la propagation en zigzags commune aux éclairs et aux étincelles des machines électriques. De la discussion détaillée des observations publiées par de Lisle, Arago conclut que les éclairs de première classe peuvent parcourir dans l'atmosphère des distances très considérables, et que, dans certains cas, ils n'ont pas moins de *trois* ou *quatre lieues* de longueur.

Deuxième classe. — Les éclairs de la deuxième classe sont de beaucoup les plus communs ; leur lumière, au lieu d'être concentrée en un trait sinueux, est diffuse et embrasse de très grandes surfaces. Ces éclairs n'ont pas la vivacité de ceux de la première classe ; souvent leur teinte est *rouge très intense ;* quelquefois le *bleu* et le *violet* y dominent. Parfois ces éclairs n'illuminent que les contours des nuages, d'autres fois leur lumière envahit toute la surface de ces mêmes nuages.

Troisième classe. — Dans cette troisième classe, Arago range des globes de feu de volume très variable qui, dans les temps d'orage, traversent l'atmosphère avec une vitesse plus ou moins grande, mais toujours appréciable, et se dirigent vers la terre. Ces globes parfois rebondissent sur le sol comme des balles élastiques ; souvent ils se divisent en globules nombreux ; quelquefois leur disparition subite s'accompagne de détonations comparables à celles de plusieurs pièces d'artillerie ; on en voit aussi disparaître tout à coup sans aucune explosion : dans tous les cas, ils produisent sur les corps voisins les effets connus de la foudre. Arago rapporte un assez grand nombre d'observations authentiques de ces globes de feu, dont la nature électrique est incontestable, mais dont le mode de formation est complétement inconnu.

M. Wheatstone a essayé de mesurer la durée des éclairs de première et de deuxième classe. Le procédé qu'il a employé dans cette circonstance est fondé sur le fait bien connu de la persistance des impressions que la lumière produit sur la rétine. Lorsqu'un point lumineux, un charbon par exemple, tourne autour d'un point fixe assez

vite pour décrire une circonférence de cercle en *un dixième* de seconde, l'impression produite sur la rétine par le charbon au moment où il occupe un point quelconque de son trajet dure encore quand, après avoir fait un tour entier, le charbon reprend de nouveau cette position ; il semble alors que le charbon occupe simultanément tous les points de la courbe, et nous voyons une circonférence lumineuse sans lacune ni solution de continuité appréciables.

Prenons une roue d'argent mat portant *cent rais déliés, plats et non polis*. Lorsque cette roue, immobile et dans l'obscurité, est frappée par un jet de lumière, chaque rais renvoie de la lumière diffuse autour de lui dans toutes les directions, et se dessine nettement sur un fond noir avec ses véritables dimensions. Imprimons à cette roue un mouvement de rotation très rapide autour de son centre, et imaginons qu'elle soit illuminée par un éclair. Si, pendant que l'éclair traverse l'atmosphère, la roue a le temps de se déplacer, chaque rais, en vertu de la persistance des impressions de la rétine, paraîtra nécessairement élargi dans le sens du mouvement ; de la vitesse connue de la roue et de la valeur de cet élargissement on pourra conclure la durée réelle de l'éclair. Or, quelque vitesse que M. Wheatstone ait imprimé à cette roue d'argent, toujours les rais lui ont paru immobiles dans l'espace et avec leurs véritables dimensions, quand l'appareil était frappé par la lumière d'un éclair. De la discussion très détaillée de ces recherches, Arago a conclu que la durée des éclairs de première et de deuxième classe, malgré le long trajet des premiers et

l'étendue des surfaces illuminées par les seconds, est *certainement moindre que la millième partie d'une seconde de temps.*

Tonnerre. — On donne le nom de *tonnerre* à un bruit particulier qui succède ordinairement à l'éclair. D'après ce que nous savons du mode de transmission de l'électricité dans la décharge disruptive (tome Ier, p. 186), au moment de l'apparition de l'éclair, il se produit, dans la masse gazeuse de l'atmosphère, une *rupture*, une *solution de continuité* qui livre passage aux deux électricités en présence. Le tonnerre, comme le bruit qui accompagne l'étincelle des machines, reconnaît donc pour cause un mouvement de vibration communiqué aux couches atmosphériques un instant écartées par le flux d'électricité.

Le tonnerre fournit un moyen très simple de calculer la distance *en ligne droite* qui sépare l'observateur des nuages au milieu desquels l'éclair est produit. Nous savons, en effet, qu'à la température de 16 degrés, le son parcourt, dans l'air, 340 mètres *par seconde ;* il suffit donc de multiplier 340 par le nombre de *secondes* écoulées entre l'apparition de l'éclair et le moment où l'on commence à entendre le tonnerre pour évaluer en mètres la distance des nuées orageuses.

Le bruit du tonnerre présente des caractères spéciaux fort remarquables, et qui, de tout temps, ont fortement attiré l'attention des observateurs. Ce bruit n'est pas instantané, il se prolonge pendant un temps variable ; *un seul éclair* peut être suivi de *roulements* qui se succèdent sans interruption appréciable pendant 15, 20,

25, 30 et même 45 *secondes*. Cette prolongation du bruit est une conséquence naturelle du long trajet que l'éclair parcourt dans l'atmosphère. En raison de l'instantanéité de l'éclair, toutes les couches d'air traversées par la décharge du nuage sont ébranlées en même temps, et chacune d'elles devient le point de départ d'un bruit qui se propage avec une vitesse de 340 mètres par seconde. Ces couches d'air étant elles-mêmes inégalement éloignées de l'observateur, ces divers bruits ne lui parviennent pas à la fois, mais successivement et à des intervalles de temps variables avec la distance de leur point d'origine. On comprend ainsi comment, dans le cas où l'éclair est tout entier situé du même côté du zénith, la durée du tonnerre peut servir à calculer *une limite inférieure* de la longueur du trajet parcouru par la décharge électrique.

Le tonnerre produit par *un seul éclair* est encore remarquable par des diminutions et des accroissements successifs d'intensité qui lui donnent un caractère tout particulier, et l'ont fait comparer au bruit d'une lourde charrette qui descend rapidement un chemin très rocailleux. L'expression si juste et si généralement adoptée de *roulement* du tonnerre rend assez bien ces alternatives d'intensité. Souvent le tonnerre commence par un *roulement sourd* auquel succèdent de *bruyants éclats*, suivis eux-mêmes d'un *roulement* final qui s'affaiblit graduellement et rapidement ; en sorte que le *maximum* d'intensité n'existe ordinairement ni au commencement, ni à la fin de la détonation qui suit l'éclair.

Le bruit déterminé par le passage de l'éclair à travers l'atmosphère peut être réfléchi par les murs des édifices,

les rochers, les bois, les flancs des collines et des montagnes ; tout démontre que les nuages peuvent aussi se conduire comme des surfaces réfléchissantes. Le phénomène de l'écho doit donc, dans beaucoup de circonstances, jouer un grand rôle dans la production des *roulements* du tonnerre. La durée de ces *roulements*, qui quelquefois s'étend jusqu'à 30, 40 et même 45 *secondes*, n'est pas une raison suffisante pour rejeter cette explication d'une manière absolue. Scoresby, près des lacs *Killarney*, a constaté lui-même qu'un *simple coup de pistolet* répété par les échos était *entendu* pendant 30 *secondes ;* nul doute que le bruit d'une détonation plus intense, de celle d'un coup de canon par exemple, n'eût été prolongé par ces échos pendant 40 à 45 secondes. Cependant les jeux des échos ne peuvent pas rendre compte de toutes les particularités du bruit du tonnerre ; pour comprendre les phénomènes dans leur ensemble, il suffit de faire intervenir une circonstance sur laquelle *Robert Hooke* a le premier appelé l'attention des physiciens, et dont Arago a bien fait ressortir toute l'importance dans sa belle Notice.

En raison de la vitesse de propagation de l'électricité, les ébranlements déterminés dans la masse gazeuse de l'atmosphère sur le trajet de l'éclair peuvent être comparés à ceux qui seraient produits par une longue file de soldats déchargeant tous leurs armes *au même instant*. En suivant cette comparaison, il est facile de se rendre compte de toutes les particularités du tonnerre.

Supposons les soldats placés à *un mètre* de distance et en série rectiligne ; supposons en outre l'observateur placé à une extrémité de la file et à *un mètre* du premier

soldat. Toutes les armes sont déchargées à la fois, toutes les détonations sont produites au même instant, mais elles arrivent successivement à l'observateur qui perçoit d'abord le bruit du premier fusil, puis celui du second, puis celui du troisième, etc. Et, comme le son ne parcourt que 340 mètres par seconde, il est évident que le bruit perçu par l'observateur à la suite de toutes ces détonations simultanées se prolongera pendant *une seconde* pour une file de 340 soldats, pendant *deux secondes* pour 680 soldats, et en général pendant un nombre *n* de *secondes* pour une file composée de *n* fois 340 soldats.

La file de soldats restant *rectiligne*, l'observateur peut se placer en un point quelconque de la perpendiculaire élevée sur son milieu. Le premier bruit qu'il percevra sera évidemment celui du fusil du soldat du milieu de la file. Il recevra ensuite, successivement et *par couples*, les bruits des fusils de chaque groupe de deux soldats symétriquement placés par rapport au milieu. Ces détonations produiront donc un *roulement* d'une certaine durée qui se terminera par les bruits des fusils des deux soldats placés aux extrémités de la file. — Les soldats étant rangés circulairement, plaçons l'observateur au centre de la circonférence. Dans ce cas, l'observateur sera à égale distance de tous les soldats, il n'entendra plus de roulement, mais une *seule détonation* formée de la réunion des bruits de *tous les fusils déchargés en même temps.*

A la suite de ces considérations, Arago ajoute : « Ai-je » besoin d'en dire davantage pour que chacun comprenne » l'étroite liaison qu'il y a entre les *éclats* du tonnerre et » les *zigzags* des éclairs ? Quand un éclair qui fuyait, si

» cette expression m'est permise, dans une direction abou-
» tissant à l'œil de l'observateur, se replie sur lui-même
» pour se présenter pendant quelques instants de face, il
» est de toute évidence qu'il en doit résulter une aug-
» mentation de bruit. Il n'est pas moins clair que cette
» augmentation sera suivie à son tour d'un affaiblisse-
» ment brusque, si par une seconde inflexion l'éclair se
» trouve amené de nouveau à se mouvoir à peu près
» dans la direction de la ligne visuelle, et ainsi de
» suite. »

Par un ciel parfaitement *serein*, on aperçoit souvent des *éclairs sans tonnerre*. Tous les physiciens sont d'accord pour admettre que, dans le plus grand nombre des cas, ces *éclairs de chaleur* sont la réverbération, sur des couches atmosphériques plus ou moins élevées, d'éclairs ordinaires produits au sein d'un orage placé au-dessous de l'horizon et trop éloigné pour que le tonnerre puisse être entendu. L'exactitude de cette explication ne saurait être mise en doute; car d'une part tout démontre que les couches atmosphériques jouissent d'une force réfléchissante suffisante pour que la lumière de l'éclair réverbéré à leur surface conserve une intensité appréciable, et d'autre part il existe dans la science des observations authentiques d'orages qui éclataient au-dessous de l'horizon au moment et dans la direction où les *éclairs de chaleur* étaient aperçus. Cependant les *éclairs de chaleur* ne sont pas toujours concentrés dans le voisinage de l'horizon; leur lumière se développe quelquefois sur toute l'étendue du ciel visible. Il serait donc possible que par un *ciel serein*, l'air fût traversé quelquefois par des éclairs directement

produits au milieu d'une atmosphère sans nuages et fortement électrisée.

L'observation démontre que, par un *ciel couvert*, il peut y avoir des éclairs sans tonnerre, sans qu'on puisse invoquer l'extrême éloignement pour se rendre compte de l'absence de bruit. Ces éclairs silencieux sont quelquefois engendrés au sein des nuages orageux : M. Griswold a publié la relation d'une trombe qui était le foyer d'éclairs très brillants, et, bien qu'il fût seulement à 400 mètres du météore, *il n'entendait absolument aucune détonation*. Il serait difficile d'expliquer comment des décharges électriques d'une telle intensité peuvent, dans certaines circonstances, traverser l'atmosphère sans produire de bruit.

Par un temps couvert et nuageux, il n'est pas extrêmement rare d'entendre des tonnerres qui n'ont été précédés d'aucun éclair. Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de concevoir l'existence de deux couches distinctes de nuages superposés, et de supposer qu'un orage éclate et se localise dans la couche supérieure. Si les nuages inférieurs sont opaques et très épais, la lumière des éclairs sera complétement interceptée, mais le bruit sera propagé comme à l'ordinaire; le tonnerre sera donc entendu à la surface de la terre par un observateur qui ne verra pas l'éclair qui l'a précédé. Cette explication donnée par Arago est d'accord avec les relations de certains orages fournies par les voyageurs les plus véridiques.

On peut aussi, par un *ciel serein*, entendre le tonnerre sans éclair. Dans certaines circonstances, ce phénomène

doit être attribué à l'existence d'un orage situé au-dessous de l'horizon, et dont les éclairs ne sont pas aperçus. Cependant, de la discussion de quelques faits très rares, Arago a cru devoir conclure que le tonnerre peut quelquefois éclater au milieu d'une atmosphère complétement dépouillée de nuages.

Coup de foudre. — Les nuages orageux suspendus dans l'atmosphère agissent par influence sur les corps placés à la surface du sol. Ces effets d'induction sont quelquefois assez prononcés pour déterminer l'apparition de lumières vives et légèrement sifflantes sur les parties saillantes des corps terrestres. Ces lueurs ont de tout temps fortement attiré l'attention des observateurs. César rapporte, dans ses Commentaires, qu'en Afrique, pendant un orage affreux qui éclata la nuit et mit l'armée romaine en désordre, les pointes des javelots de la cinquième légion brillèrent d'une lumière spontanée : *Quintæ legionis pilorum cacumina suâ sponte arserunt.* Des faits de ce genre sont mentionnés dans les écrits de Sénèque, de Tite-Live, de Pline, de Plutarque, de Procope. Les anciens considéraient les apparitions de ces flammes sur les mâts, les vergues et les cordages des bâtiments, comme des présages. Une *seule flamme* était un signe menaçant, et prenait le nom d'*Hélène; deux* annonçaient une heureuse traversée, et recevaient la dénomination de *Castor et Pollux.*

Ces idées superstitieuses se conservèrent, parmi les hommes de mer, jusqu'au XVIIe siècle. Les marins donnaient à ces flammes les noms de *feux Saint-Elme* ou de *cierges de Saint-Elme;* ils considéraient leur apparition

comme un signe certain de la cessation de la tempête et du retour du beau temps. Parmi les exemples de lueurs électriques développées par induction sur les extrémités des objets terrestres dans les temps d'orage, nous empruntons les deux suivants à la Notice d'Arago.

Le 14 janvier 1824, à la suite d'un orage, M. *Maxadorff* ayant porté ses regards sur un chariot chargé de paille qui se trouvait *au-dessous d'un gros nuage noir*, au milieu d'un champ près de *Cothen*, observa que tous les brins de paille se redressaient et paraissaient en feu. Le fouet même du conducteur jetait une vive lumière. Ce phénomène disparut *dès que le vent eût emporté le nuage :* il avait duré *dix* minutes.

Le 8 mai 1831, après le coucher du soleil, des officiers d'artillerie et du génie se promenaient tête nue, pendant un orage, sur la terrasse du fort *Bab-Azoun* à Alger. Chacun, en regardant son voisin, remarqua avec étonnement, aux extrémités de ses cheveux tout hérissés, de petites aigrettes lumineuses. Quand ces officiers levaient les mains, des aigrettes se formaient aussi au bout de leurs doigts.

Ajoutons enfin que, dans les temps d'orage, l'électricité des nuages développe par induction, dans les fils des télégraphes électriques, de véritables courants qui déterminent eux-mêmes certaines perturbations dans la marche des appareils à signaux.

Lorsque la tension développée à la surface du sol par l'action inductrice des nuages orageux est très considérable, la décharge s'opère brusquement entre un nuage et un objet terrestre, et produit un éclair de première classe accompagné d'un violent coup de tonnerre. Cet

éclair prend le nom de *coup de foudre*, et détermine sur son passage des effets de même nature, mais beaucoup plus intenses, que ceux dont nous avons parlé à propos des grandes décharges électriques.

Effets mécaniques. — La foudre produit des phénomènes de transport très remarquables. On a vu des toitures entières d'églises foudroyées enlevées comme par une mine, des murailles démolies et les pierres dont elles étaient construites projetées au loin, des quartiers de rochers brisés, soulevés et déplacés. Un fait de ce genre très extraordinaire a été rapporté par Arago dans sa Notice sur le tonnerre : un mur de briques du poids de 26 tonnes (26 à 27000 kilogrammes) fut arraché de ses fondements par un coup de foudre, soulevé et transporté en masse à environ 2 mètres de distance. Arago pense que ces effets de transport et de projection sont produits par la transformation subite en vapeur des filets d'eau que la foudre rencontre sur son passage.

Dans les édifices foudroyés on a vu souvent les vitres des fenêtres et des plaques métalliques percées d'un ou plusieurs trous. Ces effets ressemblent à ceux qu'on produit avec les décharges des batteries électriques dans les expériences du *perce-carte* et du *perce-verre*. Le même coup de foudre peut d'ailleurs percer de plusieurs trous une même plaque de métal.

Effets physiques. — Les coups de foudre peuvent altérer l'état magnétique d'une aiguille aimantée. Des observations nombreuses attestent que, sur des vaisseaux foudroyés, certaines aiguilles ont eu leurs pôles renversés, et d'autres ont perdu toute trace de magnétisme. Dans

des cas plus rares et cependant authentiques, les pôles ont été *déplacés*, rejetés hors du grand axe de l'aiguille, de telle manière que ce grand axe prenait toute autre direction que celle d'un méridien magnétique. La foudre peut aussi, comme les décharges électriques, aimanter d'une manière permanente les masses de fer et d'acier près desquelles elle passe ou qu'elle frappe.

La foudre élève la température des corps qu'elle traverse. Lorsqu'elle se propage le long d'un conducteur métallique, ce conducteur peut, selon ses dimensions, être échauffé, rougi, fondu ou même volatilisé. Ainsi, dans les habitations foudroyées, les dorures des cadres des glaces sont enlevées, réduites en vapeur, sans que le bois soit attaqué au-dessous ; les fils des sonnettes sont fondus, et tombent à terre sous forme de globules incandescents ; des épées présentent des traces de fusion à leur pointe et sur leur tranchant ; des masses métalliques plus considérables sont fondues aux points d'entrée et de sortie de la foudre. C'est toujours au moment où elle change de conducteur que la foudre produit le plus grand échauffement ; quand elle parcourt une grosse chaîne métallique, les anneaux ne paraissent pas endommagés dans leur continuité, mais ils sont fondus et parfois restent soudés dans les points où ils se touchent. Si l'on prenait à la lettre le récit de quelques voyageurs, et surtout des anciens, on serait conduit à admettre que la foudre peut déterminer la *fusion complète* de masses métalliques aussi considérables que de grosses pièces de monnaie, et même de sabres tout entiers. Dans une discussion approfondie de tous ces faits, Arago a montré que ces récits sont évidemment

exagérés, et que les plus grosses tiges métalliques fondues en entier par l'électricité atmosphérique n'ont pas plus de *six* à *huit millimètres* de diamètre.

Sur les rochers du sommet des Alpes, des Pyrénées et des plus hautes montagnes, les voyageurs rencontrent souvent des *bulles* et des *couches vitreuses*, résultat de la fusion des couches superficielles de ces rochers opérée par des coups de foudre. D'après des observations dignes de toute confiance, ces coups de foudre qui frappent les sommets des hautes montagnes ne partent pas toujours de nuages placés au-dessus de leur niveau, mais sont fournis, dans certains cas, par la *face supérieure* de nuées orageuses situées au-dessous.

Dans les grands amas de sable, on trouve quelquefois des tubes de longueur et de forme variables, composés de grains de quartz agglutinés, et dont la paroi intérieure est un verre parfait. Ces *tubes de foudre*, ou *fulgurites*, sont le résultat de l'élévation de température déterminée dans les portions de ces buttes de sable traversées, par la foudre.

Ajoutons enfin que souvent, à la suite des grands orages, se déclarent de violents incendies déterminés par l'inflammation de piles de céréales, de meules de fourrages, d'amas de bois ou de toute autre matière combustible, frappés de la foudre.

Effets chimiques. — Depuis les belles recherches de M. Liebig sur la composition des pluies d'orage, les effets chimiques des éclairs qui traversent l'atmosphère ne sont plus contestés par personne. Les eaux des pluies d'orage, en effet, contiennent de l'azotate d'ammoniaque; la for-

mation de ce sel est facile à comprendre. Au moment où un éclair traverse l'atmosphère humide, la vapeur d'eau est décomposée, l'oxygène et l'hydrogène électrisés provenant de cette ségrégation se combinent avec l'azote de l'air, et donnent naissance, d'une part à de l'acide azotique, et d'autre part à de l'ammoniaque. La présence démontrée de l'acide azotique dans l'eau de pluie est invoquée par Arago pour rendre compte de l'existence de *nitrières naturelles*, dans certaines localités où il n'y a pas trace de matières animales. M. Boussingault pense que cet azotate d'ammoniaque, directement formé dans l'atmosphère et entraîné vers le sol par les eaux de pluie, joue le rôle d'un *véritable engrais*, et contribue puissamment à l'entretien de la belle végétation des régions intertropicales où, pendant des mois entiers, le tonnerre gronde chaque jour avec tant de force.

Effets physiologiques. — Un violent coup de foudre suffit pour dépouiller les arbres de leur écorce, désorganiser leur tronc, le dessécher et le réduire en minces fragments épars sur le sol. Les grands animaux frappés de la foudre sont profondément blessés, et même souvent tués instantanément. Nous nous contenterons de donner ici ces simples indications ; cette question sera traitée avec tous les détails convenables dans la partie de notre travail consacrée à l'étude des effets physiologiques de l'électricité et de son influence sur les êtres organisés.

Marche de la foudre. — Quelque capricieuse que sa marche paraisse au premier abord, quand la foudre traverse un grand bâtiment, il est toujours possible de se rendre compte des causes qui déterminent son trajet

général et ses changements brusques de direction, en se rappelant le mode suivant lequel s'exerce l'induction et les propriétés des courants électriques. Ainsi les coups de foudre frappent généralement le faîte des édifices, et de préférence les pièces métalliques qui se trouvent sur ce faîte. Une fois engagée sur un conducteur métallique d'un diamètre suffisant, la foudre le parcourt dans toute son étendue, sans s'attaquer aux objets voisins; parvenue à l'extrémité du conducteur, elle s'élance avec détonation sur ceux des corps environnants qui conduisent le mieux l'électricité, et même souvent traverse des murailles épaisses pour aller frapper des pièces métalliques placées derrière ou dans leur épaisseur. Quand le conducteur envahi par la foudre est de diamètre trop petit pour lui donner un facile et rapide écoulement, l'électricité acquiert sur ce conducteur une tension très grande et exerce une induction puissante sur les corps environnants. Souvent, alors, la foudre abandonne le conducteur primitif, se détourne de sa direction, traverse de grands espaces, et se porte, à travers tous les obstacles intermédiaires, sur quelques corps métalliques. — Au moment où la foudre passe d'un corps à un autre, les matières solides sont brisées, pulvérisées, projetées au loin. Quand une barre métallique conduit la foudre à une certaine profondeur dans le sol, si la terre est *sèche*, elle y pénètre en déterminant une explosion suivie de dégâts considérables; mais, si le sol est *fortement imprégné d'humidité*, la foudre s'écoule silencieusement dans le terrain environnant, et ne produit aucun effet mécanique appréciable.

MOYENS DE SE GARANTIR DE LA FOUDRE.

Les coups de foudre sont trop fréquents et les désastres de toute nature qui les accompagnent sont trop considérables pour que, dans tous les temps, l'homme n'ait pas cherché les moyens de se mettre à l'abri de ses atteintes, de s'opposer à la formation des orages, et de les dissiper quand ils sont déjà formés.

D'après Hérodote, les *Thraces* avaient l'habitude de *tirer des flèches contre le ciel* quand il faisait des éclairs ou qu'il tonnait. D'ailleurs, l'historien ne laisse subsister aucun doute sur l'origine et le but d'une telle pratique ; il se hâte d'ajouter que les *Thraces* agissaient ainsi pour *menacer le ciel*.

Partant de cette idée que la foudre ne pénètre jamais en terre au delà d'*un mètre soixante centimètres*, les anciens considéraient les cavernes comme des asiles parfaitement sûrs. Au rapport de Suétone, l'empereur *Auguste* avait l'habitude, dès qu'un orage menaçait, de se retirer dans un lieu bas et voûté. Il serait difficile d'assigner avec exactitude la profondeur *maximum* à laquelle la foudre peut pénétrer dans le sol ; cependant l'observation des tubes fulminaires montre que ses effets se propagent quelquefois jusqu'à *dix mètres* de la surface.

Kæmpfer rapporte que les empereurs du Japon font établir un *réservoir d'eau* au-dessus de la grotte où ils se réfugient pendant les orages. L'eau est destinée à *éteindre le feu de la foudre*. A ce sujet, il est bon de rapporter que quelquefois la foudre tombe dans des lacs ou dans

des rivières, et que, dans ce cas, les poissons ne sont pas épargnés. Nous verrons plus loin, à propos des paratonnerres, que, si *une nappe d'eau naturelle* fournit à l'électricité un écoulement assez facile pour préserver d'une manière à peu près certaine tout ce qui est placé au-dessous, il n'en est pas de même des *citernes* et des *réservoirs artificiels* dont le fond et les côtés sont rendus étanches à l'aide de fortes maçonneries.

Des faits nombreux démontrent que, contrairement à l'opinion généralement accréditée dans l'antiquité, une personne *au lit et couchée* peut être frappée de la foudre.

Les Romains croyaient que la foudre ne tombe jamais sur le *laurier*. Suétone rapporte que l'empereur *Tibère*, imbu de cette idée, ne manquait pas de porter une couronne de laurier quand le ciel était orageux. Toutes les observations s'accordent pour démontrer que le laurier n'est pas plus que les autres arbres à l'abri de la foudre.

Les Romains considéraient les *peaux de veau marin* comme un préservatif efficace de la foudre. On en faisait des tentes sous lesquelles les personnes timorées se retiraient pendant les orages. Suétone raconte qu'*Auguste* portait toujours une de ces peaux. — De nos jours encore les bergers des Cévennes ont l'habitude d'entourer la forme de leurs chapeaux avec des *peaux sèches de serpents ;* ils se croient alors préservés des atteintes de la foudre. Est-il besoin d'insister pour faire sentir toute l'inanité de semblables pratiques?

Cependant, à cause de leurs propriétés isolantes, certaines étoffes employées comme vêtements peuvent, pendant les temps d'orage, exercer une influence préserva-

trice. Ainsi, le jour où la foudre tomba sur l'église de *Châteauneuf-les-Moustiers*, trois prêtres étaient à l'autel. *Deux* furent gravement frappés, le *troisième* n'éprouva aucun mal ; lui seul était revêtu d'*ornements de soie*. — Au contraire, les *pièces métalliques* de nos ajustements, du moins quand leur volume est considérable, doivent être considérées comme augmentant le danger : quand la foudre tombe sur un homme ou sur une femme, elle attaque toujours plus particulièrement ces pièces métalliques. L'exemple suivant est propre à démontrer l'influence des masses de métal un peu fortes. En 1829, le 21 juillet, le tonnerre tomba sur la prison de *Riberac* (*Souabe*) ; la foudre alla frapper dans la grande salle, *au milieu de vingt détenus, un condamné qui était enchaîné par la ceinture*.

Une enveloppe de verre peut sans doute atténuer les dangers que l'on court pendant les temps d'orage, il ne faut pas cependant considérer les parois vitreuses comme des barrières impénétrables à la foudre. Les exemples de vitres percées d'un *trou circulaire sans fissure* sont fréquents, dans les relations des dégâts causés par la foudre dans de grands édifices habités.

Contrairement à une opinion très accréditée, rien ne démontre qu'un courant d'air puisse influer sur le trajet de la foudre. Il n'est donc pas vrai de dire qu'un homme aggrave le danger qui le menace, quand il laisse les *croisées de son appartement ouvertes*, ou quand *il court* pendant les temps d'orage.

Les arbres, en raison de leur élévation au-dessus des objets environnants, sont souvent frappés de la foudre.

De là est venu le précepte excellent de ne pas chercher un abri sous les branches des arbres pendant les temps d'orage. Le docteur Winthorp conseillait aux personnes surprises en rase campagne par un orage de se placer à *huit* ou *dix* mètres de quelque grand arbre ; il pensait que, dans cette situation, on était garanti par l'arbre des atteintes de la foudre. Franklin approuvait ce précepte. L'arbre voisin, en effet, en pareille circonstance, doit jouer le rôle d'une sorte de paratonnerre. Cependant, quoique les grands arbres, par les extrémités de leurs branches les plus élevées, donnent un écoulement facile à l'électricité accumulée par influence à la surface du sol, il ne faudrait pas les considérer comme des préservatifs assurés. Beaucoup d'observations démontrent que des maisons entourées et dominées par des arbres ont été frappées de la foudre.

Contrairement à l'opinion de Volta et de beaucoup de physiciens, Arago a établi par des faits authentiques et bien observés, qu'on peut, *sans danger d'être foudroyé*, se trouver enveloppé par des nuées épaisses et fortement orageuses.

Les matières en combustion lancent dans l'atmosphère des colonnes ascendantes de vapeurs *conductrices* de l'électricité. En partant de cette donnée de l'expérience, on comprend facilement comment on a été conduit à admettre que de *grands feux* allumés en *grand nombre* à la surface du sol peuvent agir sur les nuées orageuses, les dépouiller en partie de leur électricité et mettre, des contrées entières à l'abri des dévastations causées par les orages. Quelque rationnelle que paraisse cette pratique, l'expérience n'a pas encore démontré que l'influence de ces feux

allumés à la surface du sol soit assez considérable pour modifier d'une manière sensible l'état électrique des grandes nuées orageuses suspendues dans l'atmosphère, et amoindrir la violence des orages déjà formés ou en train de se développer. Quant à un feu *unique*, quelque étendu qu'il soit, son influence est certainement nulle. — Dans la nuit du *premier* au *deux* juillet 1811, l'hôtel de l'ambassade d'Autriche à Paris fut consumé par les flammes. Malgré la violence du feu que rien ne parvint à maîtriser, et qui dévora l'hôtel tout entier, un orage épouvantable se forma sur Paris, les éclairs se succédaient avec une rapidité effrayante, le tonnerre grondait sans interruption ; les torrents de pluie qui suivirent cet orage purent seuls éteindre les derniers vestiges de ce terrible incendie.

Les marins admettent généralement que le bruit de l'artillerie a la propriété de dissiper les nuées orageuses, et même les nuages ordinaires. Cette croyance est le point de départ de la pratique adoptée dans quelques localités de tirer le canon ou de faire éclater de nombreuses boîtes à poudre, au moment où un orage menace et se forme. On espère ainsi mettre les récoltes et les habitations à l'abri des dévastations de la grêle. Pour montrer combien cette manière de voir est peu fondée, Arago cite les faits suivants : — Le 12 septembre 1711, l'escadre de Dugay-Trouin, composée de *six* vaisseaux de ligne et de *quatre* frégates, attaque la rade de Rio-Janeiro. Du 12 au 20 septembre le feu fut très vif et très soutenu de la part des assiégés et des assiégeants; le 20 septembre, jour de l'assaut, la cannonade redouble, et cependant tout *ce bruit* n'empêche pas l'explosion d'un orage accom-

pagné, dit Dugay-Trouin, *des éclats redoublés d'un tonnerre affreux et d'éclairs qui se succédaient les uns aux autres sans laisser presque aucun intervalle.* — Le 25 août 1806, jour de l'attaque de l'île et de la forteresse de *Dannholm*, près de *Stralsund*, le général Fririon, afin d'occuper et de fatiguer la garnison suédoise, la fit canonner toute la journée. Malgré ces vives et continuelles décharges d'artillerie, un violent orage éclata sur les neuf heures du soir. — Par une rencontre singulière, le *Duke*, vaisseau anglais de 90, fut frappé de la foudre en 1793, *pendant qu'il se canonnait avec une batterie de la Martinique.* — De 1816 à 1835, il y a eu 662 *jours de tir* au polygone de Vincennes. Les registres de l'Observatoire de Paris ont prouvé à Arago que :

1° Parmi les 662 *veilles de jours d'école*, 128 jours ont été *couverts.*

2° Parmi les 662 *jours d'école*, 158 jours ont été *couverts.*

3° Parmi les 662 *lendemains de jours d'école*, 146 jours ont été *couverts.*

Ces résultats démontrent évidemment que les détonations d'artillerie n'exercent aucune influence ni sur les nuées orageuses, ni sur les nuages ordinaires.

L'habitude de sonner les cloches pendant les temps d'orage a pris évidemment son origine dans une pensée toute religieuse. La science ne peut pas admettre que le bruit et l'agitation de l'air causés par les cloches soient suffisants pour dissiper les nuées orageuses et mettre une contrée entière à l'abri des dévastations de la grêle. Hâtons-nous d'ajouter que l'observation ne démontre pas

non plus que les mêmes causes aient la puissance d'attirer et de concentrer les orages dans les localités situées au voisinage des églises dont les cloches sont mises en branle. Mais la foudre frappe les objets élevés et surtout les sommets des clochers ; la corde de chanvre qui sert à mettre les cloches en mouvement est un conducteur d'électricité : pour toutes ces raisons, le *sonneur* qui, pendant un orage, monte au clocher s'expose certainement à un très grand danger. Cette considération est plus que suffisante pour qu'on doive s'abstenir avec soin de mettre les cloches en branle dans les localités menacées par un orage.

DU PARATONNERRE.

Depuis que l'identité de l'électricité et de la matière fulminante a été démontrée, on a compris que le meilleur moyen de mettre les grands édifices, les magasins et les vaisseaux à l'abri des ravages de la foudre, est de fixer, sur les combles des bâtiments et sur le sommet des mâts, des appareils construits selon les indications données par Franklin, et connus sous le nom de *paratonnerres*.

Un paratonnerre se compose (Fig. 447, 448) de deux parties principales : — une tige métallique solidement encastrée par sa partie inférieure et dont la partie supérieure se termine en pointe aiguë ; — un conducteur métallique destiné à mettre la base de la tige en communication avec le sol.

Tige métallique. — La tige métallique elle-même (Fig. 448) est composée d'une grosse barre de fer T, d'une baguette de cuivre *d*, et d'une pointe de platine P.

La portion *g* de la barre de fer T, très variable dans sa longueur et dans sa forme, traverse la toiture et sert à fixer l'appareil aux grosses pièces de la charpente. L'embase *aa*, placée à *sept* ou *huit* centimètres de la toiture, est soudée à la tige de fer et sert à rejeter les eaux pluviales.

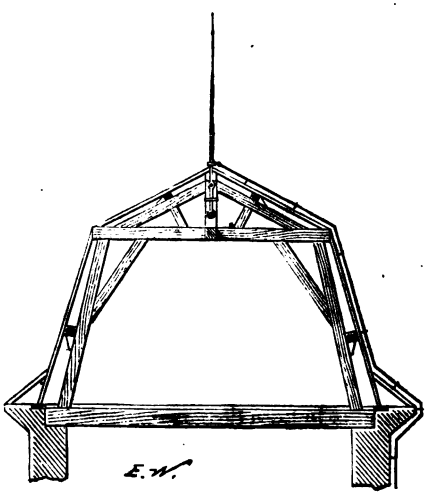


Fig. 447.

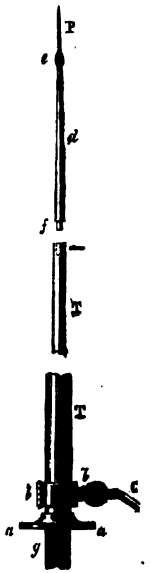


Fig. 448.

La baguette de cuivre *d* est fixée à la partie supérieure de la tige de fer T au moyen d'un gougeon *f* qui s'engage à vis dans chacune d'elles ; deux goupilles placées à angle droit servent à consolider ce gougeon.

La pointe de platine P est soudée à l'argent à la baguette

de cuivre *d*. Un manchon de cuivre *e* enveloppe la soudure, et rend plus stable l'union de ces deux pièces.

De l'embase *aa* à l'extrémité de la pointe de platine P, la longueur de l'appareil est de *neuf* à *dix* mètres. Les trois pièces superposées qui composent cette tige ont ordinairement les dimensions suivantes :

Barre de fer T, au-dessus de l'embase *aa*..	$8^m,60$
Baguette de cuivre *d*.....	$0^m,60$
Pointe de platine P.....	$0^m,05$

La barre de fer T a *cinq* centimètres de diamètre au niveau de l'embase *aa*; les trois pièces superposées forment un cône dont la section transversale s'amincit régulièrement jusqu'à l'extrémité de la pointe de platine P.

Conducteur. — Immédiatement au-dessus de l'embase *aa*, un collier métallique *bb* est fortement serré autour de la barre de fer. A ce collier on fixe solidement à l'aide d'un boulon une barre de fer carrée C, de 15 à 20 millimètres de côté, qui prend le nom de *conducteur*. Cette barre de fer est quelquefois remplacée par un gros câble de fil de fer; les divers torons qui composent ce câble et le câble lui-même sont goudronnés avec soin à l'extérieur, pour empêcher l'eau de pénétrer et préserver les fils de fer contre l'action destructive de l'oxydation. Le conducteur, soutenu et fixé par des crampons métalliques, descend le long de la toiture, s'incurve pour embrasser la corniche, s'applique contre les murs du bâtiment, et est ainsi conduit jusqu'au sol, où il se termine en satisfaisant à des conditions particulières d'une grande importance.

Pour que le paratonnerre exerce autour de lui une action protectrice efficace, il doit être relié métalliquement à toutes les grosses pièces métalliques qui entrent dans la construction des charpentes, des conduites d'eau, et des autres parties de l'édifice.

Quant au conducteur, il ne suffit pas qu'il touche le sol. La terre sèche ne conduit pas bien l'électricité; autant que possible, le conducteur doit, par son extrémité inférieure, plonger d'*un* à *deux* mètres dans un puits, dans un vaste étang, dans une rivière, ou dans une nappe d'eau *naturelle*. C'est à tort que quelquefois on s'est contenté d'immerger le conducteur dans l'eau de citernes dont les parois et le fond étaient rendus étanches par d'épaisses maçonneries. Ces réservoirs artificiels entourés de matières très faiblement conductrices ne donnent pas un écoulement facile à l'électricité. Les paratonnerres dont les conducteurs sont placés dans ces conditions vicieuses peuvent occasionner de très graves accidents pendant les orages violents. — Quand on ne peut pas faire communiquer le conducteur avec une nappe d'eau naturelle, il est indispensable de le faire pénétrer assez profondément dans le sol pour que son extrémité soit, dans une assez grande étendue, en contact avec des couches de terre *constamment humides*. On a soin, dans ce cas, d'entourer le conducteur avec de la *braise de boulanger;* ce charbon qui a été fortement *rougi* est un *bon conducteur*, et protége le métal contre l'action destructive de la rouille.

Fonction du paratonnerre. — Toutes les fois qu'un nuage orageux passe dans le voisinage d'un édifice, les

pièces métalliques qui entrent dans sa construction s'électrisent fortement par influence. Si le sommet de l'édifice est muni d'un paratonnerre établi conformément aux règles précédentes, l'électricité de même nature que celle du nuage est refoulée dans le conducteur et dans le sol où elle se répand librement; l'électricité de nom contraire, attirée vers la pointe de l'appareil, s'écoule rapidement dans l'atmosphère. Par ce moyen, malgré la puissante action inductrice du nuage orageux, si le paratonnerre est en communication avec les pièces métalliques de l'édifice; si, depuis sa pointe jusqu'à l'extrémité inférieure du conducteur, toutes les parties du paratonnerre sont réunies de manière à former un tout continu; si enfin la communication du conducteur avec le réservoir commun est bien établie, là tension électrique de l'édifice sera maintenue à un degré assez faible pour rendre très difficile, sinon tout à fait impossible, une décharge foudroyante de la masse nuageuse.

Il est bien facile de démontrer que, pendant les temps d'orage, le conducteur et la tige des paratonnerres sont traversés par des masses considérables d'électricité. Ce fait a été établi d'une manière irrévocable par les expériences de Beccaria. En 1753, ce physicien avait établi un paratonnerre sur le toit de *San-Giovanni di Dio*, à Turin. La tige était portée sur un support isolant; en face de la base de la tige et *à une faible distance* était placée l'extrémité supérieure d'un conducteur dont la communication avec le sol était bien établie. Toutes les fois qu'un nuage orageux passait dans le voisinage de l'appareil, la

solution de continuité était traversée par une série d'étincelles. Quand l'intensité de l'orage était considérable, les étincelles étaient très vives, se succédaient sans interruption, et s'accompagnaient d'un bruit continu.

Beccaria avait disposé son appareil de manière que la pointe terminale pût être à volonté dirigée vers *la terre* ou vers *le ciel*. Toutes choses égales d'ailleurs, les étincelles qui traversaient la solution de continuité étaient beaucoup plus vives et beaucoup plus nombreuses quand la pointe était dirigée vers le ciel, que quand elle était tournée vers la terre. Cette expérience remarquable démontre, d'une manière irrévocable, la supériorité des paratonnerres à *pointe* conseillés par Franklin et universellement adoptés, sur les paratonnerres à *boules* que, dès l'origine, on avait essayé de leur substituer.

Dans les temps d'orage, les paratonnerres fonctionnent *silencieusement* d'une manière continue, et déversent dans l'atmosphère des masses considérables d'électricité. La nuit on est averti de ce phénomène par les vives aigrettes qui se montrent aux extrémités des paratonnerres. Nous sommes ainsi conduits à admettre que les paratonnerres peuvent exercer une influence sur l'état électrique des nuages eux-mêmes, diminuer leur tension, et affaiblir la violence des orages. Cette manière de voir se trouve confirmée par de nombreuses observations. — Toaldo assure avoir vu deux fois à *Nymphenbourg*, en Allemagne, des nuées orageuses d'où partaient incessamment les plus vifs éclairs, s'avancer vers le château et n'être plus, *après avoir dépassé les paratonnerres*, que des nuées ordinaires, que des nuées où n'apparaissait aucun

jet lumineux, que des *charbons éteints* suivant l'expression de Toaldo. — En 1785, M. Cosson, curé de Rochefort, après avoir signalé, dans une lettre à l'abbé Berthlolon, les vives aigrettes qui surmontaient le paratonnerre de l'église pendant l'orage du 4 décembre, ajoute : « Un » nuage qui jetait beaucoup d'éclairs, et dans lequel gron- » dait le tonnerre, devint tranquille et ne donna plus » que quelques lueurs assez faibles, aussitôt après que le » vent d'ouest l'eut fait passer au-dessus du paratonnerre » de l'église. » — C'est ici le lieu de rappeler les résultats obtenus par de Romas avec des *cerfs-volants* lancés dans les airs, à des hauteurs de 130 à 160 mètres, pendant les temps d'orage. La corde de son appareil fournissait spontanément de très nombreuses étincelles dont quelques-unes, de *trois* mètres de longueur et de 27 millimètres de grosseur, étaient accompagnées de détonations pareilles à des coups de pistolet. Le physicien de Nérac observa quelquefois que, pendant la durée de ses expériences, *les éclairs et le tonnerre cessaient totalement*.

Ces observations montrent que l'électricité déversée dans l'atmosphère par les paratonnerres est en quantité assez considérable pour modifier profondément la tension de nuées orageuses isolées ou occupant un espace restreint. Il ne saurait en être de même de ces nuages denses, serrés, fortement électrisés et tous *solidaires les uns des autres* qui, pendant un violent orage, recouvrent entièrement des régions de plusieurs lieues d'étendue. Évidemment, en pareil cas, l'effet produit par quelques paratonnerres est insignifiant par rapport à l'énorme masse d'électricité répandue à la surface des nuées.

Pendant un orage très violent, un paratonnerre peut être frappé de la foudre. Mais, si la construction de l'appareil est bonne, l'édifice n'en est pas moins à l'abri de tout dégât ; l'électricité s'écoule dans le sol à travers le conducteur. Dans ce cas, les diverses parties et surtout les pointes des paratonnerres peuvent être sérieusement endommagées. A la suite de ces accidents, les appareils doivent être visités et soigneusement réparés.

Ce que nous venons de dire des paratonnerres nous permet de signaler les inconvénients graves qui résulteraient d'une installation vicieuse, et de mieux préciser certaines conditions auxquelles doivent satisfaire les diverses parties de ces appareils.

1° Quand la pointe est émoussée, l'écoulement de l'électricité n'est pas assez rapide, la tension électrique de la barre peut devenir assez considérable pour déterminer l'explosion d'un coup fulminant. Ajoutons que, si le reste de l'appareil est en bon état, l'électricité s'écoule en entier par le conducteur, et l'édifice est garanti.

2° Si le conducteur présente quelque solution de continuité, ou si sa communication avec le sol n'est pas bien établie au moyen d'une couche de terre humide ou d'une nappe d'eau naturelle, le danger est plus grand. Si, en effet, le paratonnerre était foudroyé, l'électricité, ne trouvant pas un écoulement facile dans le sol, se déchargerait sur quelque partie du bâtiment lui-même et déterminerait sur son passage les dégâts ordinaires d'un coup de foudre. — Dans ce cas, même en l'absence du coup de foudre, le paratonnerre peut devenir dangereux par lui-même. La tension électrique communiquée par in-

fluence à la tige et au conducteur devient quelquefois assez considérable pour déterminer une *décharge latérale* qui foudroie, détruit ou enflamme les objets voisins.

3° Nous savons que tout conducteur oppose au passage de l'électricité une résistance qui varie en *raison directe* de sa longueur et en *raison inverse* de sa section transversale. Pendant les temps d'orage, lorsque les diverses parties du paratonnerre sont traversées par des quantités très considérables d'électricité, le conducteur est nécessairement dans un état de tension électrique dont l'intensité augmente proportionnellement à la résistance qu'il oppose à l'écoulement du fluide. Quand cette tension devient trop forte, le conducteur agit par influence sur les objets voisins, et fournit quelquefois une *déchorge latérale* qui équivaut à un véritable coup de foudre. Pour éviter les accidents de ce genre, il faut, dans l'établissement des paratonnerres, satisfaire aux conditions suivantes :

a. — Le conducteur doit avoir le moins de longueur possible, et aboutir par le plus court chemin au lieu où il s'enfonce dans le sol.

b. — Le conducteur doit avoir assez de grosseur pour donner un facile écoulement à l'électricité fournie par un coup de foudre. L'expérience prouve qu'il suffit d'employer des barres ou des câbles métalliques de 20 à 25 millimètres de diamètre.

c. — Les angles favorisent l'écoulement de l'électricité et les décharges latérales ; on doit donc soigneusement éviter d'infléchir trop brusquement le conducteur sur lui-même dans les parties de son trajet où forcément il change de direction.

De la sphère d'action des paratonnerres. — Il serait fort important de connaître avec exactitude la distance à laquelle l'action préservatrice d'un paratonnerre s'étend horizontalement autour de sa base. Malgré le puissant intérêt qui s'y rattache, cette question est encore loin d'être suffisamment élucidée. Cependant, depuis 1823, époque à laquelle Gay-Lussac communiqua à l'Académie des sciences sa belle instruction sur les paratonnerres, les physiciens admettent généralement que cette action préservatrice s'étend horizontalement, dans tous les sens, à une distance *double* de la hauteur de la tige du paratonnerre. Arago a réuni dans sa notice des faits nombreux et bien observés qui justifient l'adoption de cette limite proposée par Gay-Lussac.

Pour mettre un vaste édifice à l'abri des dévastations de la foudre, il est donc nécessaire de l'armer de plusieurs paratonnerres. D'ailleurs ces appareils doivent être d'autant plus nombreux et d'autant plus rapprochés, qu'ils ont moins de hauteur. Somme toute, le nombre et l'espacement des paratonnerres employés sont déterminés par cette règle générale que nous empruntons à Arago :

« Il ne doit y avoir sur un comble, sur une terrasse, etc., » aucun point dont la distance horizontale à la tige la » plus voisine soit plus grande que le *double* de la hau- » teur de cette tige au-dessus de sa base. »

Généralement la foudre frappe les parties les plus élevées des édifices ; cependant il suffit de la présence d'une masse métallique placée sur les angles ou sur les parois d'un bâtiment pour que le coup fulminant soit dévié. D'ailleurs, pendant les temps d'orage, il n'est pas

rare que des lambeaux de nuages fortement électrisés soient séparés par le vent de la source commune, et rejetés dans le voisinage de la terre. Ces circonstances expliquent comment, malgré la présence de paratonnerres placés sur le faîtage, les coups de foudre s'attaquent quelquefois directement et de préférence aux parties latérales et même inférieures des grands bâtiments. Il résulte de ces considérations qu'il ne suffit pas de placer des paratonnerres verticaux sur les parties les plus élevées de la toiture; il est utile d'en implanter quelques-uns *horizontalement ou dans des positions très inclinées sur l'entablement des édifices*. Ces derniers paratonnerres peuvent seuls agir efficacement sur les nuages très bas poussés par le vent, et mettre les parois latérales de ces édifices à l'abri des coups de foudre.

FIN DU TOME DEUXIÈME ET DERNIER.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME DEUXIÈME.

AVANT-PROPOS V

CHAP. IV. — Lois générales des courants électriques..... 1

ART. I. — Des résistances du circuit électro-dynamique.. 2

Tout conducteur oppose une certaine résistance à la propagation du courant..... 2

§ I. — Résistances des conducteurs solides et liquides... 3

Fil normal. — Longueur réduite — Résistance spécifique..... 5

Rhéostat 6

Lois de la résistance des conducteurs solides..... 8

Lois de la résistance des conducteurs liquides 11

Détermination de la résistance spécifique..... 12

Tableau des résistances spécifiques des métaux..... 13

Tableau des résistances spécifiques des liquides..... 16

§ II. — Résistances au passage..... 17

Dispositions qui permettent de plonger toutes les lames métalliques d'une pile voltaïque dans une même auge remplie de liquide actif..... 25

Piles de Muncke, Joung et Faraday..... 30

§ III. — Expressions des résistances d'un circuit électro-dynamique 35

Résistance de l'électromoteur..... 35

Longueur réduite d'un électromoteur..... 39

De la conductibilité..... 39

Résistance du circuit interpolaire..... 41

Résistance totale d'une partie ramifiée du circuit interpolaire..... 42

ART. II. — Mesure de l'intensité des courants..... 45

§ I. — Rhéomètres..... 46
Galvanomètre..... 46
Boussole des sinus..... 49
Boussole des tangentes..... 52
Modifications de M. Gaugain..... 54
§ II. — Voltamètres..... 57
Voltamètre à eau acidulée..... 57
Voltamètre à dissolution saline..... 62
ART. III. — Lois des intensités des courants..... 63
§ I. — Expression de l'intensité du courant..... 64
A. Circuit fermé par le contact des pôles opposés de l'électromoteur..... 65
B. Circuit fermé par un conducteur interpolaire..... 67
Détermination de la résistance de l'électromoteur... 69
Influence du circuit interpolaire sur l'intensité du courant..... 70
1° Cas d'un couple unique..... 71
2° Cas d'une pile..... 73
§ II. — De l'intensité du courant et de la force électromotrice dans les diverses sections du circuit.... 75
Intensité du courant en divers points du circuit..... 75
Force électromotrice dans les diverses sections du circuit..... 77
Propositions générales..... 81
Effets de la tension électrique dans le circuit voltaïque.. 83
§ III. — Lois des courants dérivés..... 88
ART. IV. — Association des couples..... 96
§ I. — Association en série..... 96
§ II. — Association par opposition..... 99
§ III. — Association en batterie..... 103
A. Les couples associés sont égaux..... 103
B. Association en tension de deux couples inégaux... 114
ART. V. — Mesure des forces électromotrices..... 123
§ I. — Forces électromotrices des appareils hydro-électriques..... 124
Méthode de mensuration..... 124
Appareil de mensuration..... 127
Influence de la dilution et de la nature des liquides... 136
Influence des diaphragmes poreux..... 137

Forces électromotrices des combinaisons voltaïques à deux liquides..... 138
§ II. — Forces électromotrices des appareils thermo-électriques..... 140
ART. VI. — Mesure des quantités d'électricité en mouvement..... 145
Quantité d'électricité des courants..... 145
Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau..... 148
Mesure de l'équivalent électrique..... 149
Comparaison des piles hydro-électriques et des machines électriques à plateau de verre..... 150
CHAP. V. — Induction électro dynamique et magnéto-électrique..... 156
ART. I. — Phénomènes d'induction dans les fils métalliques..... 156
§ I. — Action inductrice des courants voltaïques..... 157
Cas relatifs aux conducteurs rectilignes..... 157
Spirales planes et cylindriques..... 163
Loi de Lenz..... 168
De la quantité d'électricité mise en mouvement et de la force électromotrice développée par induction dans un circuit métallique fermé..... 169
a. — Induction produite par un mouvement relatif du circuit voltaïque et du circuit métallique fermé.. 169
b. — Induction produite par une variation d'intensité du courant inducteur..... 171
Spirales à deux fils..... 172
Avantages de la disposition des fils en spirale..... 172
Commutateur..... 174
Roue d'interruption..... 176
Roue à séparation des courants d'induction..... 178
Rhéotrope..... 179
Propriétés des courants induits..... 181
Tension électrique des extrémités des circuits soumis à l'induction..... 183
Action inductrice d'un courant voltaïque sur son propre circuit..... 185
Extra-courant direct ou de rupture..... 186
Extra-courant inverse..... 190

Comparaison des deux courants induits inverse et direct fournis par une même bobine..... 195
§ II. — Action inductrice des aimants..... 202
Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'intensité de l'action inductrice..... 211
§ III. — Induction terrestre..... 212
§ IV. — Courants induits de divers ordres..... 216
Influence des diaphragmes placés entre les spirales inductrices et induites..... 222
Influence des courants induits développés à la surface du noyau de fer doux..... 226
§ V. — Action inductrice des décharges d'électricité statique..... 228
ART. II. — Considérations générales sur les courants d'induction..... 233
Propositions générales..... 233
Distribution des tensions dans un circuit induit..... 237
Intensité du courant induit..... 240
ART. III. — Phénomènes d'induction dans les masses métalliques en mouvement..... 242
§ I. — Plaques métalliques rectangulaires glissant parallèlement à leurs faces..... 242
La plaque glisse dans le sens de sa longueur..... 243
La plaque glisse dans le sens de sa largeur..... 244
§ II. — Plaques métalliques tournant autour de leur centre..... 248
Cas d'une plaque tournant entre les deux pôles d'un aimant..... 251
Cas d'une plaque tournant au-dessous d'un barreau aimanté horizontal..... 252
Ligne de plus grande action..... 254
§ III. — Magnétisme de rotation..... 255
Explication du magnétisme de rotation..... 259
§ IV. — Influence des courants induits sur les mouvements des masses métalliques..... 261
Chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement..... 264
ART. IV. — Phénomènes d'induction dans les liquides... 268
ART. V. — Électromoteurs fondés sur l'induction..... 269
§ I. — Condensateur électro-chimique..... 270

§ II. — Appareil magnéto-électrique de Pixii..... 272
§ III. — Machine de Clarke..... 282
§ IV. — Appareil de Ruhmkorff..... 290
Condensateur annexé au circuit inducteur..... 295
Condensateur annexé au circuit induit..... 298
Fractionnement de la bobine induite..... 301
Inégalité des deux courants induits..... 303
Inégale tension des extrémités de la spirale induite... 305
Inégale température des deux pôles du courant direct.. 305
Association des appareils de Ruhmkorff en série..... 306
Interrupteur de M. L. Foucault..... 308
Disposition pour l'association des machines d'induction en série..... 314
Interrupteur à double effet de M. L. Foucault..... 320
Dernières machines de M. Ruhmkorff..... 322
Comparaison des appareils d'induction et des autres électromoteurs..... 323
CHAP. VI. — Action du magnétisme sur la lumière et sur tous les corps..... 325
ART. I.—Action du magnétisme sur la matière pondérable.. 328
Grand électro-aimant de M. Ruhmkorff..... 328
§ I. — Action du magnétisme sur les corps solides..... 331
Tableau des métaux paramagnétiques et des métaux diamagnétiques..... 335
§ II. — Action du magnétisme sur les liquides..... 338
§ III. — Action du magnétisme sur les gaz..... 342
§ IV. — Du pouvoir magnétique..... 345
Influence de la chaleur..... 345
Influence du milieu ambiant sur les phénomènes déterminés par le magnétisme..... 348
Détermination du pouvoir magnétique des corps..... 354
Tableau des pouvoirs magnétiques des corps sous volume égal et rapportés au vide..... 358
§ V. — Influence de l'état moléculaire des corps..... 358
§ VI. — De la polarité diamagnétique..... 365
Recherches de M. Verdet..... 367
Recherches de M. Tyndall..... 368
ART. II. — Action du magnétisme sur la lumière polarisée.. 376
Appareil expérimental..... 377

A. Substances transparentes qui ne contiennent pas de métal paramagnétique..... 380
B. Substances transparentes qui contiennent un métal paramagnétique..... 382
Lois de l'action du magnétisme sur la lumière..... 385
Nature du phénomène..... 390
CHAP. VII.—Effets mécaniques et physiques de l'électricité.. 394
Vitesse de propagation de l'électricité..... 394
Recherches de MM. Fizeau et Gounelle..... 394
Tableau des déterminations diverses de la vitesse de propagation de l'électricité..... 407
Causes du ralentissement de l'électricité dans les télégraphes souterrains et sous-marins..... 408
ART. I. — Effets mécaniques..... 412
Action mécanique du courant sur les métaux paramagnétiques..... 412
Transport des liquides dans le circuit voltaïque..... 414
ART. II. — Effets calorifiques..... 420
§ I. — Chaleur développée pendant le passage des décharges d'électricité statique..... 421
Appareil de M. Riess..... 422
Température communiquée à un fil métallique par la décharge électrique..... 423
Quantité de chaleur développée dans un fil métallique et dans le circuit entier par la décharge..... 425
§ II. — Chaleur développée pendant le passage des courants voltaïques..... 428
Quantité de chaleur développée dans le circuit entier et dans une section quelconque du circuit..... 431
Les lois du dégagement de la chaleur sont les mêmes pour les courants et pour les décharges électriques.. 433
Origine de la chaleur développée par les courants voltaïques..... 434
Propositions de M. Joule..... 435
Recherches de M. Favre. — Cas dans lequel le courant n'exerce pas d'action hors de son circuit..... 436
La chaleur développée dans le circuit est égale à celle qui correspond à l'action chimique accomplie dans l'électromoteur..... 436
Cas dans lequel le courant produit un travail en dehors de son propre circuit..... 441

Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur 443
Causes de la supériorité du couple de Grove sur celui de Wollaston et sur celui de Daniell..... 444
Rapport entre les forces électromotrices des couples et les quantités de chaleur développées par les courants de ces couples..... 447
Influence de l'amalgamation du métal positif du couple. 449
Influence du milieu ambiant sur l'échauffement des fils métalliques traversés par un courant voltaïque.. 451
Phénomènes calorifiques déterminés par le passage des courants électriques à travers les soudures des circuits métalliques..... 454
Effets calorifiques observés dans l'arc voltaïque..... 459
ART. III. — Effets lumineux..... 459
§ I. — Effets lumineux des décharges d'électricité statique..... 460
Étincelle. — Elle change de forme et d'éclat avec la distance explosive et la nature du gaz ambiant.... 460
Chaleur de l'étincelle..... 465
Décharge latérale de l'étincelle..... 466
Aigrette..... 468
Composition de l'aigrette..... 470
Influence de la nature des gaz sur la forme et la couleur de l'aigrette..... 473
Aigrette fournie par un conducteur négatif..... 474
Lueur..... 476
Décharges dans les milieux gazeux très raréfiés..... 478
Formes diverses de la gerbe lumineuse dans les gaz très raréfiés..... 480
Expériences de Davy sur le passage des décharges à travers les gaz et les vapeurs très raréfiés..... 486
§ II. — Effets lumineux des appareils d'induction..... 490
Gerbe lumineuse dans l'œuf électrique..... 491
Stratification de la lumière électrique..... 494
Stratification de la lumière des étincelles des condensateurs..... 498
§ III. — Effets lumineux des courants voltaïques..... 499
Arc voltaïque..... 501
Haute température de l'arc voltaïque..... 505

Action des pôles magnétiques sur l'arc voltaïque.... 507
Régulateur de la lumière électrique..... 510
§ IV. — Intensité de la lumière électrique..... 516
Étincelles de décharge..... 516
Arc voltaïque..... 520
Influence du mode d'association des couples sur la longueur et l'intensité lumineuse de l'arc..... 523
§ V. — Composition de la lumière électrique..... 524
Découverte des raies brillantes du spectre électrique.. 525
Travail de M. L. Foucault sur la double raie lumineuse D, et la raie *verte* de l'arc de l'argent..... 526
Composition du spectre des étincelles des condensateurs..... 529
Composition du spectre de l'arc voltaïque..... 532
Composition du spectre des décharges des appareils d'induction avec condensateur annexé au circuit induit..... 533
Conclusions générales sur la composition du spectre de la lumière électrique..... 533

Quatrième section. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE..... 535

Travaux de Franklin..... 535
Expérience de Marly-la-Ville..... 537
Expérience du cerf-volant..... 538
Électroscope atmosphérique de de Saussure..... 539
Électroscope de Volta..... 541
Influence des corps en combustion placés autour de la pointe de l'électroscope..... 542
Électroscope atmosphérique de Peltier..... 544
Galvanomètre atmosphérique..... 546
Distribution de l'électricité atmosphérique..... 547
Temps serein..... 548
La tension électrique des couches atmosphériques augmente avec leur altitude..... 550
Observation d'Erman..... 551
Méthode d'observation de Peltier..... 554
Variations quotidiennes et mensuelles de la tension électrique de l'atmosphère..... 555
Temps couvert..... 556

Nuages positifs..... 556
Nuages négatifs..... 557
Sources de l'électricité atmosphérique..... 558
De l'évaporation des eaux comme source d'électricité atmosphérique..... 559
De l'orage..... 561
Hauteur des nuages orageux..... 562
Éclairs..... 562
1° Éclairs de première classe..... 563
2° Éclairs de deuxième classe..... 564
3° Éclairs de troisième classe..... 564
Durée des éclairs..... 564
Tonnerre..... 566
Explication des *roulements* du tonnerre..... 568
Circonstances diverses dans lesquelles les éclairs peuvent se montrer et le tonnerre peut se faire entendre..... 570
Coup de foudre..... 572
Phénomènes d'influence des nuées orageuses..... 572
Effets mécaniques de la foudre..... 574
Effets physiques de la foudre..... 574
Effets chimiques de la foudre..... 576
Effets physiologiques de la foudre..... 577
Marche de la foudre..... 577
Moyens de se garantir de la foudre..... 579
Pratiques des anciens..... 579
Influence des vêtements — des courants d'air — du voisinage des grands arbres..... 580
Influence des grands feux en plein air..... 582
Influence des coups de canon..... 583
Habitude de sonner les cloches pendant les orages... 584
Du paratonnerre..... 585
Description du paratonnerre..... 585
Fonction du paratonnerre..... 588
Conditions auxquelles doit satisfaire le paratonnerre.. 592
De la sphère d'action du paratonnerre..... 593
Paratonnerres inclinés..... 594

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME DEUXIÈME ET DERNIER.

ANCIENNE MAISON CROCHARD, 1804.

LIVRES DE FONDS

DE LA LIBRAIRIE

VICTOR MASSON

MÉDECINE ET SCIENCES

ASSORTIMENT

D'OUVRAGES SCIENTIFIQUES ALLEMANDS.

PARIS

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE.

15 Janvier 1858.

Tous les ouvrages portés dans ce Catalogue sont expédiés par la poste, dans les départements et en Algérie, *franco* et sans augmentation sur les prix désignés. — Joindre à la demande des *timbres-poste* ou un *mandat* sur Paris.

La librairie Victor Masson tient un assortiment de tous les ouvrages importants récemment publiés en Allemagne sur les sciences naturelles, notamment ceux sortis des presses de l'imprimerie impériale et royale de Vienne.

Elle se charge de faire venir, dans les 15 jours de la commande, soit d'Allemagne, soit d'Angleterre, les ouvrages de toute nature publiés dans ces pays.

AGENTS DE LA LIBRAIRIE VICTOR MASSON

CHEZ LESQUELS ON EST INVITÉ A DÉPOSER TOUT CE QU'ON DÉSIRE LUI ADRESSER.

A Londres,

MM. Williams et Norgate, *Henrietta Street, Covent Garden.*

A New-York,

M. H. Baillière, 290, *Broadway.*

A Leipzig,

M. Franz Wagner, *Poststrasse.*

On trouvera chez M. Franz Wagner le Catalogue avec prix en thalers, et un assortiment des livres de fonds de la librairie Victor Masson.

CATALOGUE

DES LIVRES DE FONDS

DE VICTOR MASSON

ADANSON (Michel). — **Cours d'histoire naturelle**, comprenant le Règne animal, précédé d'une introduction et accompagné de notes par M. J. Payen, membre de l'Institut, professeur de botanique à la Faculté des sciences. Paris, 2 vol. grand in-18, avec tableaux..... 7 fr.

AGARDH (J.). — **Algæ maris Mediterranei et Adriatici**, observationes in diagnosin specierum et dispositionem generum. Parisiis, 1841, grand in-8..... 3 fr. 50

AGARDH (J.). — **Species, genera et ordines Algarum**: — volumen primum, Algas fucoideas complectens. Lundæ, 1848, 1 vol. in-8... 12 fr. Volumen secundum, Algas floridas complectens. Quatuor fasciculi. Lundæ, 1851-1852..... 27 fr.

AGASSIZ. — Système glaciaire, ou Recherches sur les glaciers, leur mécanisme, leur ancienne extension, et le rôle qu'ils ont joué dans l'histoire de la terre. Paris, 1847, 1 vol. grand in-8, avec un atlas de 3 cartes et 9 planches en partie coloriées..... 50 fr.

AIMÉ (G.). — **Recherches de physique générale sur la Méditerranée**. Paris, 1846, 1 vol. gr. in-4 jésus, avec 6 planches gravées en taille-douce..... 30 fr.

AIMÉ (G.). — **Observations sur le magnétisme terrestre**. Paris, 1846, 1 vol. gr. in-4 jésus, avec 26 pl. gravées en taille-douce.... 36 fr.

Ces deux ouvrages font partie de l'Exploration scientifique de l'Algérie, publiée par ordre du gouvernement (section de Physique générale).

ALGÉRIE (**Exploration scientifique de l'**) pendant les années 1840, 1841, 1842, publiée par ordre du gouvernement et avec le concours d'une commission académique.

Le travail typographique de cette magnifique publication est exécuté par les presses de l'Imprimerie impériale. Les papiers sont choisis parmi les plus beaux échantillons du Marais. Les cartes et les planches sont gravées sur cuivre par les plus habiles artistes; rien, en un mot, n'est négligé pour que l'exécution réponde à l'importance de l'œuvre.

I. **Étude des routes suivies par les Arabes** dans la partie méridionale de l'Algérie et de la régence de Tunis, pour servir à l'établissement du réseau géographique de ces contrées ; par E. CARETTE, commandant du génie, membre et secrétaire de la commission. 1 vol. gr. in-8, avec 1 carte sur papier de Chine..... 15 fr.

II. **Recherches sur la géographie** et le commerce de l'Algérie méridionale, par E. CARETTE; accompagnées d'une notice sur la géographie de l'Afrique septentrionale, et d'une carte, par M. RENOU, membre de la commission. 1 vol. in-8, avec 3 cartes sur papier de Chine.. .... 15 fr.

III. **Recherches sur l'origine et les migrations des principales tribus de l'Afrique septentrionale**, et particulièrement de l'Algérie ; par E. CARETTE. Paris, 1853, 1 vol. in-8..... 12 fr.

IV et V. **Études sur la Kabylie** proprement dite, par E. CARETTE. 2 vol. in-8 avec une carte de la Kabylie, grand aigle..... 24 fr.

VI. **Mémoires historiques et géographiques sur l'Algérie**, par E. PELLISSIER, consul de France à Souça. 1 vol. in-8..... 12 fr.

VII. **Histoire de l'Afrique**, par MOHAMMED-EL-KAÏROUANI ; traduite par MM. PELLISSIER et RÉMUSAT. 1 vol. grand in-8..... 12 fr.

VIII. **Recherches géographiques sur le Maroc**, par M. RENOU, membre de la commission scientifique ; suivies du traité avec le Maroc, d'itinéraires et de renseignements sur le pays de Sous, et de renseignements sur les forces de terre et de mer et sur les revenus territoriaux du Maroc. 1 vol. in-8, avec une carte du Maroc sur papier de Chine, gr. aigle. 12 fr.

IX. **Voyages dans le sud de l'Algérie** et des États barbaresques de l'ouest et de l'est, par AL-ALIACI-MOULA-AHMED, traduits par M. ADRIEN BERBRUGGER, membre de la commission. 1 vol. in-8..... 12 fr.

X à XV. **Précis de jurisprudence musulmane**, ou Principes de législation musulmane civile et religieuse, selon le rite malékite, par KHALIL-IBN-ISH'AH, traduit de l'arabe et accompagné d'une table alphabétique et analytique par M. PERRON. Paris, 1848-1852, 7 forts vol. gr. in-8. 92 fr.

XVI. **Description de la régence de Tunis**, par E. PELLISSIER, membre de la commission. 1 vol. in-8, avec une carte..... 12 fr.

Chaque volume se vend séparément.

ALIBERT (C.). — Des eaux minérales dans leurs rapports avec l'économie publique, la médecine et la législation. Paris, 1852, in-8.... ..... 1 fr. 50

ANDRAL. — Clinique médicale, ou Choix d'observations recueillies à l'hôpital de la Charité ; 4e édition, revue, corrigée et augmentée. Paris, 1840, 5 volumes in-8..... 40 fr.

ANDRAL. — Essai d'hématologie pathologique. Paris, 1843, in-8..... ..... 4 fr.

ANDRAL ET GAVARRET. — Recherches sur le sang ; modifications de proportions de quelques principes du sang (fibrine, globules, maté-

riaux solides du sérum et eau) dans les maladies. Paris, 1841, 2e tirage, 1849, in-8..... 3 fr. 50

ANDRAL ET GAVARRET. — Réponse aux principales objections dirigées contre les procédés suivis dans les analyses du sang et contre l'exactitude de leurs résultats. Paris, 1842, brochure in-8. 2 fr. 50

ANDRAL ET GAVARRET. — Recherches sur la quantité d'acide carbonique exhalée par le poumon dans l'espèce humaine. 1843. 1 fr. 25

Annales de chimie et de physique.

Annales des sciences naturelles.

Annales d'oculistique.

Annales médico-psychologiques.

Pour ces quatre recueils, voyez : *Publications périodiques*, pages 27 et suivantes.

AUDOUIN (V.) ET MILNE-EDWARDS. — Recherches pour servir à l'histoire naturelle du littoral de la France, ou Recueil de mémoires sur l'anatomie, la physiologie, la classification et les mœurs des animaux de nos côtes. 2 volumes grand in-8, ornés de planches gravées et coloriées avec le plus grand soin.

Tome I. Introduction, avec 6 cartes..... 17 fr.

Tome II. Annélides, avec 18 planches..... 17 fr.

AUVERT (ALEX.). — Selecta Praxis medico-chirurgicæ quam Monquæ exercet; typis et figuris expressa Parisiis, moderante *Amb. Tardieu*. Deuxième édition. Paris, 1856. 2 vol. grand in-folio, cartonnés..... 500 fr.

Les mêmes, reliés en demi-maroquin, tranche supérieure dorée. 540 fr.

Cette magnifique clinique iconographique du docteur *Alex. Auvert*, de Moscou, comprend 120 planches grand in-folio demi-colombier, gravées en taille-douce, tirées en couleur et retouchées au pinceau.

Chaque sujet est accompagné d'un texte explicatif imprimé dans le même format et placé en regard de la planche.

BASSET (N.). — Traité théorique et pratique de la fermentation, considérée dans ses rapports généraux avec les sciences naturelles et l'industrie. Paris, 1858, 1 vol. gr. in-18..... 7 fr.

BAUDRIMONT ET G. S. MARTIN SAINT-ANGE. — Du développement du fœtus; mémoire présenté à l'Académie des sciences. Paris, 1850. Beau volume in-4, avec 18 planches gravées en taille-douce et magnifiquement coloriées. Prix, cartonné..... 18 fr.

BECQUEREL (A.). — Séméiotique des urines, ou Traité des altérations de l'urine dans les maladies, suivie d'un Traité de la maladie de Bright aux divers âges de la vie. *Ouvrage couronné par l'Académie des sciences dans sa séance du 19 décembre* 1842. Paris, 1841, 1 volume in-8, avec 17 tableaux..... 7 fr. 50

BERTILLON (A.). — Conclusions statistiques contre les détracteurs de la vaccine, ou Essai sur la durée comparative de la vie humaine au XVIIIe et au XIXe siècle; précédées d'une introduction sur

l'application de la méthode statistique à l'étude de l'homme. Paris, 1857, 1 vol. gr. in-18..... 4 fr.

BICHAT. — Recherches physiologiques sur la vie et la mort, 3e édition, ornée d'une vignette sur acier, précédée d'une Notice sur la vie et sur les travaux de Bichat, et suivie de notes par M. le docteur CERISE. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18..... 3 fr.

BLANCHARD (ÉMILE). — **Organisation du règne animal** publiée par livraisons grand in-4, contenant chacune deux planches magnifiquement gravées et une feuille et demie de texte. Prix de chaque livraison. 6 fr.

22 livraisons sont en vente.

BOINET. — Iodothérapie ou de l'emploi médico-chirurgical de l'Iode et de ses composés, et particulièrement des injections iodées. Paris, 1855, 1 vol. in-8..... 9 fr.

BOITEL. — Mise en valeur des terres pauvres par le pin maritime, culture et exploitation de cette essence en Gascogne et en Sologne; par M. Boitel, inspecteur général de l'agriculture; 2e édition, entièrement refondue. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8, avec une planche et vignettes dans le texte..... 6 fr.

BONAMY, BROCA ET BEAU. — Atlas d'anatomie descriptive du corps humain; ouvrage pouvant servir d'atlas à tous les traités d'anatomie.

L'Atlas d'anatomie descriptive du corps humain comprendra 250 planches format grand in-8 jésus, toutes dessinées d'après nature et lithographiées. Il est publié par livraisons de 4 planches, avec un texte explicatif et raisonné en regard de chaque planche.

Prix de chaque livraison : Avec planches noires..... 2 fr.
— Avec planches coloriées..... 4 fr.

L'Atlas sera divisé en 4 parties qui seront vendues séparement et sans augmentation de prix, savoir :

1re APPAREIL DE LA LOCOMOTION. Complet en 84 planches dont 2 sont doubles.

	Pris broché.	Avec demi-reliure.
Figures noires.....	44 fr.	47 fr.
— coloriées.....	88	92

2e APPAREIL DE LA CIRCULATION. Complet en 64 planches.

Figures noires.....	32 fr.	35 fr.
— coloriées.....	64	68

3e APPAREILS DE LA DIGESTION, DE LA RESPIRATION, GÉNITO-URINAIRE. En cours de publication.

BORSIERI (J. B.), DE KANILFELD. — Instituts de médecine pratique. Des Fièvres et des Maladies exanthématiques fébriles, traduits et accompagnés d'une étude comparée sur le génie antique et l'idée moderne en médecine; par le docteur P. E. CHAUFFARD. Paris, 1855, 2 vol. grand in-8..... 16 fr.

BOUQUET (J. P.). — Histoire chimique des eaux minérales et thermales de Vichy, Cusset, Vaisse, Hauterive et Saint-Yorre; analyses chimiques des eaux minérales de Médague, Châteldon, Brugheas et Seuillet. Paris, 1855, 1 vol. in-8 avec 2 cartes et 1 planche..... 7 fr. 50

BOURGUIGNON. — Traité entomologique et pathologique de la gale de l'homme. *Mémoire couronné par l'Académie des sciences.* Paris, 1852, 1 vol. in-4 avec 10 planches coloriées..... 20 fr.

BOUTEILLER (Jules). — **Table analytique générale** des matières contenues dans les Bulletins de la Société anatomique de Paris pour les trente premières années (1826-1855), suivie d'une table alphabétique des membres de la Société et des présentateurs de pièces ou observations mentionnées dans la première série des *Bulletins*. Paris, 1857, 1 vol. in-8. 7 fr.

BOUTIGNY (d'Évreux). — **Études sur les corps à l'état sphéroïdal** ; nouvelle branche de physique. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8, avec 26 figures intercalées dans le texte..... 7 fr.

BRIQUET (P.). — **Recherches expérimentales sur les propriétés du quinquina et de ses composés** ; ouvrage auquel l'Académie des sciences a accordé, dans sa séance du 8 janvier 1855, une récompense de 2,000 fr.; 2e édition, considérablement augmentée. Paris, 1855, 1 vol. in-8 .... 8 fr

BRIQUET (P.) et **MIGNOT** (A.). — **Traité pratique et analytique du choléra-morbus.** Paris, 1850, 1 vol. in-8..... 7 fr.

BROCA (P.). — **De l'étranglement dans les hernies abdominales et des affections qui peuvent le simuler.** Thèse de concours pour l'agrégation en chirurgie (1853). Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8..... .... 5 fr.

BRYAS (Mis Th. de). — **Études pratiques sur l'art de dessécher** et diverses impressions de voyage. Troisième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-16..... 1 fr. 50

BRONGNIART (Ad.). — **Histoire des végétaux fossiles,** ou Recherches botaniques et géologiques sur les végétaux renfermés dans les diverses couches du globe. Paris, 1828-1839; ouvrage publié en 2 vol. grand in-4 de 300 planches, paraissant par livraisons de 6 à 8 feuilles de texte et de 15 pl. Prix de chaque livraison..... 15 fr.

*** Les livraisons 1 à 12, formant le premier volume, et les trois premières (13 à 15) du tome deuxième, sont en vente.

Bulletin de l'Académie royale de médecine de Belgique.

Bulletin de la Société anatomique de Paris.

Bulletin de la Société de chirurgie de Paris.

Bulletin de la Société impériale zoologique d'acclimatation.

Pour ces quatre recueils, voyez aux *Publications périodiques*, page 30.

BUNSEN (Robert). — **Méthode gazométrique.** 1 vol. in-8 avec 60 gravures intercalées dans le texte..... 8 fr.

CABANIS. — Rapports du physique et du moral de l'homme, nouvelle édition contenant : l'extrait raisonné de Destutt de Tracy, la table alphabétique et analytique de Sue, une notice biographique sur Cabanis,

et un Essai sur les principes et les limites de la science des rapports du physique et du moral, par le docteur CERISE. 1855, 2 vol. in-18... 6 fr.

Cahiers d'histoire naturelle, par MM. MILNE-EDWARDS et ACHILLE COMTE. Ouvrage adopté par le Conseil de l'instruction publique; nouvelle édition mise en concordance avec le programme du 22 avril 1852, pour l'enseignement des sciences dans les lycées. 3 vol. in-12.

Zoologie, avec 15 pl..... 2 fr.
Botanique, avec 9 pl..... 2 fr.
Géologie, avec 8 cartes gravées sur acier..... 2 fr.
La même, avec les 8 cartes coloriées..... 4 fr.

CAP (PAUL-ANTOINE). — **Études biographiques pour servir à l'histoire des sciences.** Première série : chimistes naturalistes. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18..... 3 fr.

CHAUFFARD (P. E.). — Lettres sur le vitalisme. Paris, 1856, 1 vol. in-8..... 2 fr. 25

(Voyez ROBSIERI.)

CHOMEL (A. F.). — Éléments de pathologie générale, 4e édition, revue et augmentée. Paris, 1856, 1 vol. grand in-8..... 9 fr.

CHOMEL (A. F.). — Des Dyspepsies. Paris, 1857, 1 vol. in-8. 6 fr.

CHURCHILL (J. F.). — De la cause immédiate et du Traitement spécifique de la phthisie pulmonaire, et des maladies tuberculeuses. 1857, 1 vol. in-8..... 5 fr.

CLAVEL. — Traité d'éducation physique et morale, accompagné de plans d'ensemble indiquant la disposition principale des établissements d'instruction publique, par E. MULLER, ingénieur civil. Paris, 1855, 2 vol. grand in-18, avec 2 cartes..... 6 fr.

CLOQUET (H.). — Atlas d'anatomie, comprenant 241 planches gravées en taille-douce, 5 vol. in-4.

Parties.	Planches.	Prix.
1re Ostéologie et Syndesmologie.....	66	9 fr.
2e Myologie.....	36	5 fr.
3e Névrologie.....	36	5 fr.
4e Angéiologie.....	60	9 fr.
5e Splanchnologie et Embryologie.....	43	7 fr.
Prix de l'ouvrage complet.....	241	35

COMTE (A.). — Introduction au Règne végétal de A. L. DE JUSSIEU, disposée en tableau méthodique; une feuille gr. colombier.... 1 fr. 25

COMTE (A.). — Le Règne animal, disposé en tableaux méthodiques; ouvrage adopté par le Conseil de l'instruction publique.

Chacun des soixante-dix-huit ordres du règne animal se trouve représenté et décrit dans un ou plusieurs tableaux. La collection comprend quatre-vingt-onze tableaux, sur grand colombier, représentant environ *cinq mille figures* d'animaux..... 114 fr.

COMTE (ACHILLE). — **Structure et physiologie animales**, démontrées à l'aide de figures coloriées, découpées et superposées. Ouvrage rédigé conformément au nouveau Programme de l'enseignement scientifique dans les lycées. Paris, 1853, 1 vol. grand in-18, avec 8 planches gravées en taille-douce et figures dans le texte..... 6 fr.

COSSON (E.) ET **GERMAIN** (E.). — **Flore descriptive et analytique des environs de Paris.** Deuxième édition, sous presse pour paraître prochainement.

COSSON (E.) ET **GERMAIN** (E.). — **Atlas de la Flore des environs de Paris**, ou Illustrations de la plupart des espèces litigieuses de cette région, accompagnées d'un texte explicatif. Paris, 1845, 1 vol. grand in-18, cartonné, contenant 42 pl. grav. en taille-douce..... 9 fr.

COSSON (E.) ET **GERMAIN** (E.). — **Synopsis de la Flore des environs de Paris.** 2e édition, Paris, 1858, 1 vol. in-18..... 3 fr. 50

COSTE. — Instructions pratiques sur la pisciculture; 2e édition, entièrement remaniée. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18 avec figures dans le texte..... 1 fr. 50

†**COSTE.—Histoire générale et particulière du développement des corps organisés**, publiée sous les auspices du Ministre de l'instruction publique. Paris, 1848-1855, 3 volumes in-4, avec 50 planches grand in-plano, gravées en taille-douce, imprimées en couleur et accompagnées de contre-épreuves portant la lettre. Prix de la livraison..... 52 fr.

4 livraisons sont en vente, texte et planches.

Cours élémentaire d'histoire naturelle, adopté par le Conseil supérieur de l'instruction publique et approuvé par Mgr. l'Archevêque de Paris. 3 vol. gr. in-18.

Zoologie, par M. MILNE-EDWARDS, 8e édit., 1858, avec 473 fig. 6 fr.

Botanique, par M. A. DE JUSSIEU, 8e édit., 1858, avec 812 fig. 6 fr.

Minéralogie et **Géologie**, par M. BEUDANT, 7e édition, 1857, avec figures..... 6 fr.

Géologie, séparément. 1 vol..... 4 fr.

CUVIER (GEORGES). — **Le Règne animal** distribué d'après son organisation, 2e édit., Paris, 1829-1830, 5 vol. in-8..... 36 fr.

CUVIER (GEORGES). — **Le Règne animal** distribué d'après son organisation, pour servir de base à l'Histoire naturelle des animaux et d'introduction à l'Anatomie comparée; nouvelle édition, accompagnée de planches gravées, représentant les types de tous les genres, les caractères distinctifs des divers groupes, et les modifications de structure sur lesquelles repose cette classification, publiée par une réunion d'élèves de G. CUVIER : MM. AUDOUIN, BLANCHARD, DESHAYES, DE QUATREFAGES, D'ORBIGNY, DUGÈS, DUVERNOY, LAURILLARD, MILNE-EDWARDS, ROULIN et VALENCIENNES.

*

Le *Règne animal* de Cuvier a été publié en 262 livraisons, format grand in-8 jésus. Il comprend 11 volumes de texte, et 11 atlas ensemble de 993 planches, dont 13 sont doubles, dessinées d'après nature et gravées en taille-douce.

PRIX DE L'OUVRAGE COMPLET :

Les 11 tomes du texte, brochés en 10 volumes, les 993 planches et leurs explications réunies en 39 étuis.

Avec planches en noir..... 590 fr.
Avec les planches coloriées..... 1,310 fr.

Prix d'une demi-reliure de luxe en 10 volumes de texte et 10 atlas montés sur onglets, ensemble 20 volumes, dos et coins en maroquin, tranche supérieure dorée..... 170 fr.

Chaque division du *Règne animal* est vendue séparément comme suit :

INDICATION DE CHAQUE DIVISION.	NOMBRE de planches.	PRIX en couleur.	PRIX en noir.
		fr.	fr.
Les MAMMIFÈRES et les RACES HUMAINES, avec Atlas, par MILNE-EDWARDS, LAURILLARD et ROULIN...	121	155	70
Les OISEAUX, avec Atlas, par A. d'ORBIGNY.....	102	135	60
Les REPTILES, avec Atlas, par DUVERNOY.....	46	65	30
Les POISSONS, avec Atlas, par VALENCIENNES.....	122	160	72
Les MOLLUSQUES, avec Atlas, par DESHAYES.....	152	195	88
Les INSECTES, avec Atlas, par AUDOUIN, BLANCHARD, DUFOUR et MILNE-EDWARDS.....	202	275	124
Les ARACHNIDES, avec Atlas, par DUFOUR et MILNE-EDWARDS.....	31	45	20
Les CRUSTACÉS, avec Atlas, par MILNE-EDWARDS....	87	115	52
Les ANNÉLIDES, avec Atlas, par MILNE-EDWARDS et de QUATREFAGES.....	30	40	18
Les ZOOPHYTES, avec Atlas, par MILNE-EDWARDS et BLANCHARD.....	100	125	56

DE CANDOLLE (A.). — Géographie botanique raisonnée. Paris, 1855, 1 tome grand in-8 de 1,300 pages, divisé en 2 volumes compactes, avec 2 cartes coloriées..... 20 fr.

DE CANDOLLE. — Prodromus systematis naturalis regni vegetabilis, *sive Enumeratio contracta ordinum, generum, specierumque plantarum hucusque cognitarum.* Paris, 1854-1857, in-8.

— En vente, les tomes I à XIV..... 200 fr.
Chacun des tomes I à VII se vend séparément..... 13 fr.
Chaque partie du tome VII séparément..... 8 fr.
Chacun des volumes depuis le tome VIII se vend..... 16 fr.

Le tome XIII, 2e partie, séparément..... 12 fr.

DELABARRE. — Des accidents de la dentition chez les enfants en bas âge, et des moyens de les combattre. Paris, 1851, 1 vol. in-8, avec fig. dans le texte..... 3 fr.

DELASIAUVE. — Traité de l'épilepsie. — HISTOIRE. TRAITEMENT. — MÉDECINE LÉGALE. Paris, 1854, 1 vol. in-8..... 7 fr. 50

DELAUNAY. — Cours élémentaire de mécanique. 4e édit., Paris, 1857, 1 vol. grand in-18, avec 548 fig. dans le texte..... 8 fr.

DELAUNAY. — Cours élémentaire d'astronomie, concordant avec tous les articles du nouveau Programme officiel pour l'enseignement de la COSMOGRAPHIE dans les lycées. 2e édition. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec 389 figures dans le texte..... 7 fr. 50

DELAUNAY. — Traité de mécanique rationnelle, contenant les éléments de mécanique exigés pour l'admission à l'École polytechnique et toute la partie théorique du cours de mécanique et machines de cette école. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8, avec 127 figures dans le texte..... 8 fr.

DELAUNAY. — Trattato elementare d'astronomia atto all'insegnamento della Cosmografia; unica versione italiana autorizzata diretta dall'autore e compilata da D. Müller. Paris, 1855, 1 vol. in-18, avec 389 figures..... 8 fr.

DESHAYES (V.). — Traité élémentaire de conchyliologie, avec l'application de cette science à la géognosie. Paris, 1858, 3 vol. et atlas grand in-8 de 130 planches avec figures en noir..... 90 fr.

— *Le même*, fig. coloriées..... 200 fr.

DEVAL (CHARLES). — Traité de l'amaurose ou de la goutte sereine. Paris, 1851, 1 vol. in-8..... 6 fr. 50

DEVERGIE (A.). — Traité pratique des maladies de la peau. 2e édit. augmentée. Paris, 1857, 1 beau vol. in-8, avec planches gravées et coloriées représentant 30 types de maladies..... 14 fr.

Dictionnaire général de médecine et de chirurgie vétérinaires et des sciences qui s'y rattachent, par MM. LECOQ, REY, TISSERANT et TABOURIN, professeurs à l'École impériale vétérinaire de Lyon. — Ouvrage adopté par les écoles vétérinaires de France. Paris, 1850, 1 fort volume in-8 à 2 colonnes..... 15 fr.

DIDAY (F.). — De la syphilis des nouveau-nés et des enfants à la mamelle. Paris, 1854, 1 vol. in-8..... 7 fr.

DIEU (S.). — Traité de matière médicale et de thérapeutique, précédé de considérations générales sur la zoologie, et suivi de l'Histoire des eaux naturelles. Paris, 1847-1854, 4 vol. in-8..... 26 fr.

DINAN. — Construction des formules de transport pour l'exécution des terrassements. — Publication de l'*Ingénieur*, par M. DINAN, chef des études au chemin de fer de l'Ouest (Suisse). Paris, 1858, 1 vol. in-8..... 3 fr.

D'ORBIGNY (ALCIDE). — **Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques.** Paris, 1852, 2 tomes publiés en 3 volumes, avec 1,046 gravures dans le texte et accompagnés d'un atlas de 17 tableaux; cartonné..... 15 fr.

D'ORBIGNY (ALCIDE). — **Prodrome de paléontologie stratigraphique universelle**, faisant suite au Cours élémentaire de paléontologie et de Géologie stratigraphiques. 3 vol. gr. in-18 jésus..... 12 fr.

D'ORBIGNY (ALCIDE). — **Paléontologie française.** Description zoologique et géologique de tous les animaux mollusques et rayonnés fossiles de France, comprenant leur application à la reconnaissance des couches; avec des figures de toutes les espèces, lithographiées d'après nature.

On publie simultanément : TERRAINS CRÉTACÉS. — TERRAINS JURASSIQUES.

La livraison comprend quatre planches et du texte correspondant, format in-8.

Au 1er janvier 1858, il a paru 256 livraisons des Terrains crétacés et 108 livraisons des Terrains jurassiques.

DORVILLE. — Monographie de la pile électrique, ses dispositions actuelles, ses applications diverses et ses perfectionnements les plus récents. — Publication de l'*Ingénieur*. Paris, 1857, in-8..... 1 fr. 25

DUBREUIL (A.). — Instruction élémentaire sur la conduite des arbres fruitiers. Greffes. — taille, — restauration des arbres mal taillés ou épuisés par la vieillesse, — culture, — récolte et conservation des fruits. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 volume grand in-18, avec 120 fig..... 2 fr. 50

DUBREUIL (A.). — Cours élémentaire, théorique et pratique d'arboriculture, 4e édition. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18 de 1045 pages, publié en 2 parties, avec 5 vignettes gravées sur acier, 894 figures intercalées dans le texte et de nombreux tableaux..... 12 fr.

DUPUY (l'abbé D.). — **Histoire naturelle des mollusques terrestres et d'eau douce qui vivent en France.** Paris, 1848-1852, 2 vol. in-4, avec 36 planches lithographiées, par J. DELARUE..... 60 fr.

EDWARDS (MILNE-). — **Notions d'anatomie et de physiologie**, servant d'introduction à la Zoologie, 2e édit. Paris, 1840, 1 vol. in-8, avec 70 figures intercalées dans le texte..... 4 fr.

EDWARDS (MILNE-). — **Éléments de zoologie,** — ANIMAUX SANS VERTÈBRES, 2e édit. 1 vol. in 8, avec 422 fig. dans le texte..... 4 fr. 50

EDWARDS (MILNE-). — **Introduction à la zoologie générale,**

ou Considérations sur les tendances de la nature dans la constitution du règne animal. Première partie. 1 vol. grand in-18..... 2 fr. 25

EDWARDS (MILNE-). — **Notions préliminaires de zoologie** 1 vol. grand in-16, avec 352 figures..... 8 fr

EDWARDS (MILNE-).— **Leçons sur la physiologie et l'anatomie comparée de l'homme et des animaux**

L'ouvrage comprendra huit volumes grand in-8.
Le tome premier, comprenant l'introduction, *le Sang et les généralités sur la respiration*, et le tome deuxième, contenant les *Organes de la respiration*, sont en vente,..... 17 fr.
Le complément de l'ouvrage sera publié par demi-volumes de 8 mois en 8 mois.

ETTINGSHAUSEN (CONSTANTIN D') ET **ALOIS POKORNY.— Physiotypia plantarum austriacarum.** L'*Impression naturelle* appliquée à la représentation des plantes vasculaires et particulièrement à celle de leur nervation. 500 planches in-folio et 30 planches in-4°. Imprimé aux frais de l'Etat par l'Imprimerie impériale et royale d'Autriche. Vienne, 1856, 5 vol. in-folio et 1 vol. in-4..... 700 fr.

FANO. — Tableaux des opérations qui se pratiquent sur l'homme, ou Résumé analytique des règles principales qu'il convient de suivre pour exécuter les diverses opérations chirurgicales. I. LIGATURE DES ARTÈRES. II. AMPUTATION DES MEMBRES. Paris, 1856-1857, 2 vol. in-18. Prix de chaque..... 1 fr. 25

FÉE (A. L. A.). — Mémoire sur la famille des fougères. — Ier *Mémoire :* Classification des Fougères, — IIe *Mémoire :* Acrostichées. Strasbourg, 1844, 1 volume grand in-folio, avec 64 planches lithographiées..... 76 fr.

IIIe et IVe *Mémoires :* Vittariées, Pleurogrammées et Antrophyées. 1852, 1 vol. in-folio avec 5 pl..... 16 fr.

Ve *Mémoire :* **Genera filicum,** ou Exposition des genres de la famille des POLYPODIACÉES ; 1 vol. in-4 de 50 feuilles de texte et 32 planches analytiques, 1850-1852..... 54 fr.

VIe, VIIe et VIIIe *Mémoires :* Iconographie des espèces nouvelles décrites ou énumérées dans le *Genera filicum*. 1855-1857, in-4 avec 27 planches. 20 fr.

FIGUIER (L.). — Découvertes scientifiques modernes (Exposition et histoire des). Cinquième édition. Paris, 1858, 4 volumes grand in-18..... 14 fr.

Le tome Ier comprend : Machines à vapeur. — Bateaux à vapeur. — Chemins de fer.

Le tome II comprend : La machine électrique. — La bouteille de Leyde. — Le paratonnerre. — La pile de Volta.

Le tome III comprend : Photographie.—Télégraphie aérienne et télégraphie électrique. — Galvanoplastie et dorure chimique. — Planète Leverrier.

Le tome IV comprend : Aérostats. — Éclairage au gaz. — Éthérisation. — Poudres.

FIGUIER (Louis). — **Les Applications nouvelles de la science à l'industrie et aux arts en 1858**, machines à vapeur, bateaux à vapeur, locomotives, locomobiles, moteurs électriques, horloges électriques, tissage électrique, l'électricité et les chemins de fer, inflammation des mines, photographie, gravure photographique, galvanoplastie, lampes, bougies stéariques, éclairage électrique, chauffage par le gaz, conservation des viandes et des légumes, aluminium. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8..... 3 fr.

FILHOL (E.). — **Recherches sur les eaux minérales des Pyrénées**, comprenant l'étude de leur action thérapeutique, de leur constitution chimique, et la comparaison des ressources que les principaux établissements des Pyrénées offrent aux médecins Paris, 1858, 1 vol. grand in-18..... 5 fr.

GAUTIER (A.). — **Introduction philosophique** à l'étude de la géologie. Paris, 1853, 1 vol. in-8..... 5 fr. 50

GAVARRET. — **Physique médicale. De la chaleur** produite par les êtres vivants. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec figures dans le texte..... 6 fr.

GAVARRET. — **Traité de l'électricité**. Paris, 1857-1858, 2 vol. in-18 avec de nombreuses figures..... 16 fr.

Gazette hebdomadaire de médecine et de chirurgie.
Voyez page 31.

GEOFFROY-SAINT-HILAIRE (Isidore). — **Histoire naturelle générale des règnes organiques**, principalement étudiée chez l'homme et les animaux, tome Ier ; contenant : *Introduction historique* et *Prolégomènes*. Paris, 1854, 1 vol. in-8..... 8 fr.

Tome II, 1re partie. Paris, 1855..... 4 fr.

L'ouvrage comprendra 5 tomes ; les tomes II à V seront publiés chacun en deux parties, lesquelles paraîtront d'année en année.

GEOFFROY-SAINT-HILAIRE (Is.). — **Lettres sur les substances alimentaires, et particulièrement sur la viande de cheval**. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18..... 2 fr. 50

GERDY (P. N.). — **Chirurgie pratique complète**, fondée sur de nouvelles recherches d'anatomie, de physiologie et de clinique. Paris, 51-1855, 3 vol. in-8, avec 9 pl..... 24 fr.

GERHARDT (C.) ET CHANCEL. — Précis d'analyse qualitative Ouvrage contenant : la préparation et l'usage des réactifs, les caractères des acides et des bases. — Les essais au chalumeau. — La marche de l'analyse qualitative, la détermination des sels, l'analyse des mélanges gazeux, l'analyse immédiate des matières végétales et animales, la recherche des poisons, etc., à l'usage des médecins, des pharmaciens, des aspirants aux grades universitaires et des élèves des laboratoires de chimie. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec 48 figures dans le texte..... 5 fr.

GERHARDT (C.) ET CHANCEL. — Précis d'analyse quantitative. 1 vol. grand in-18, avec figures. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18 avec figures..... 6 fr.

GERHARDT (C.). — Traité de chimie organique (suite à la Chimie de Berzélius). 4 vol. in-8. Paris, 1853-1856, F. Didot frères.. 39 fr.

GERMAIN DE SAINT-PIERRE (E.). — Guide du botaniste, ou Conseils pratiques sur les excursions botaniques ; sur la récolte, la préparation, le classement des plantes et la conservation des herbiers ; sur l'emploi du dessin et l'usage du microscope appliqués à l'étude des plantes, et sur la rédaction des travaux botaniques ; accompagné d'un *Traité élémentaire des propriétés et usages économiques des plantes* qui croissent spontanément en France et de celles qui y sont généralement cultivées. Paris, 1851, 1 vol. in-18..... 3 fr. 50

GERMAIN DE SAINT-PIERRE (E.). — Dictionnaire des mots techniques français et latins employés dans les ouvrages de botanique. 1 vol. grand in-18. Paris, 1851.. ..... 4 fr. 50

— Le *Guide* et le *Dictionnaire* pris à la fois..... 7 fr. 50

GIRARD DE CAILLEUX. — Spécimen du budget d'un asile d'aliénés et possibilité de couvrir la subvention départementale au moyen d'un excédant équivalent de recette. Paris, 1855, 1 vol. in-4, cartonné avec tableaux..... 8 fr.

GIRARDIN. — Leçons élémentaires de chimie appliquée aux arts. Quatrième édition entièrement refondue. Paris, 1858, 2 vol. in-8, avec figures et échantillons. (*Sous presse.*)

GIRARDIN. — Des fumiers considérés comme engrais. Cinquième édition. Paris, 1841, 1 vol. in-16, avec fig..... 1 fr. 25

GIRARDIN ET DUBREUIL. — Mélanges d'agriculture, d'économie rurale et publique et de sciences physiques appliquées. Paris, 1853, 2 vol. grand in-18, avec pl. et tableaux..... 10 fr.

GIRARDIN ET DUBREUIL. — Cours élémentaire d'agriculture. Une deuxième édition est en préparation.

GODRON (D. A.). — Flore de Lorraine. Deuxième édition. Paris, 1857, 2 vol. grand in-18..... 12 fr.

GRIMAUX-DE-CAUX ET MARTIN SAINT-ANGE. — Histoire de la génération de l'homme, précédée de l'étude comparative de cette fonction dans les divisions principales du règne animal. Paris, 1 vol. in-4, avec un magnifique atlas de 12 planches gravées en taille-douce.. 9 fr.

— *Le même*, avec planches coloriées..... 18 fr.

GRISOLLE. — Traité élémentaire et pratique de pathologie interne ; 7e édition, considérablement augmentée. Paris, 1857, 2 forts volumes compactes, gr. in-8..... 18 fr.

GUENEAU DE MUSSY (N.). — Traité de l'angine glanduleuse et observations sur l'action des Eaux-Bonnes dans cette affection, précédé de considérations sur les diathèses. Paris, 1857, 1 vol. in-8 avec 1 planche..... 4 fr. 50

GUITARD (M. I.). — De la Glucosurie, de son siége, de sa nature, de ses causes et de son traitement. 1856, 1 vol. in-18, avec 1 planche..... 2 fr. 50

HEISER. — Traité de gymnastique raisonnée au point de vue orthopédique, hygiénique et médical, ou Cours d'exercices appropriés à l'éducation physique des deux sexes. Paris, 1854, 1 vol. in-8, avec 123 figures..... 6 fr.

HERPIN (de Metz). — **Études médicales et statistiques** sur les principales sources de France, d'Angleterre et d'Allemagne; avec des tableaux synoptiques et comparatifs d'analyses chimiques des eaux classées d'après les analogies de leur composition et de leurs effets thérapeutiques. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18, avec tableaux..... 4 fr. 50

HUBERT-VALLEROUX. — Essai théorique et pratique des maladies de l'oreille. Paris, 1846, 1 vol. in-8..... 5 fr.

Journal de pharmacie et de Chimie.

Voyez les PUBLICATIONS PÉRIODIQUES, p. 31.

JAMES (CONSTANTIN). — **Guide pratique du médecin et du malade** aux eaux minérales de France et de l'étranger, et aux bains de mer; suivi d'une étude sur l'hydrothérapie et d'un traité thérapeutique des maladies pour lesquelles on conseille les eaux. Quatrième édition, avec une carte itinéraire des eaux et de nombreuses vignettes gravées sur acier et imprimées sur chine, représentant les principaux établissements thermaux. Paris, 1857, 1 fort volume grand in-18 de 600 pages, broché..... 7 fr.

— *Le même*, cartonné..... 8 fr. 50

JOIGNEAUX (P.).—La Chimie du cultivateur. Paris, 1850, 1 vol. grand in-18..... 1 fr.

JOIGNEAUX (P.). — Les Prés et les Champs. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18..... 1 fr.

JOIGNEAUX (P.). — Instructions agricoles. — Paris, 1857, 1 vol. in-18..... 1 fr.

JOURDIER (A.). — Catéchisme d'agriculture de Masson-Four. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 volume grand in-18, avec 100 figures intercalées dans le texte..... 1 fr.

KLÉE (Frédᵈ.). — Le Déluge, considérations géologiques et historiques sur les derniers cataclysmes du globe. Paris, 1847, 1 vol. in-18. 3 fr.

KOELLIKER. — Éléments d'histologie humaine, traduction de MM. J. Béclard et M. Sée, revue par l'auteur. Paris, 1856, 1 vol. gr. in-8, avec 334 figures dans le texte..... 16 fr.

KUHLMANN (Frédᵈ.). — Expériences chimiques et agronomiques. Paris, 1847, 1 vol. in-8..... 3 fr. 50

KUHLMANN (Frédᵈ.). — Applications des silicates alcalins solubles au durcissement des pierres calcaires poreuses, à la peinture, à l'impression, etc. 2ᵉ édition. Paris, 1857, in-8..... 2 fr. 50

LAURENT. — Précis de cristallographie, suivi d'une Méthode simple d'analyse au chalumeau. Paris, 1847, 1 vol. grand in-18, avec 175 figures dans le texte..... 1 fr. 25

LECOQ et LAMOTTE. — Catalogue raisonné des plantes vasculaires du plateau central de la France. Paris, 1847, 1 vol. in-8. 5 fr.

LEFOULON (J.). — Nouveau Traité théorique et pratique de l'art du dentiste. Paris, 1841, 1 volume in-8, avec 130 fig. intercalées dans le texte..... 7 fr.

LEFORT (J.). — Chimie des couleurs pour la peinture à l'eau et à l'huile, comprenant l'historique, les propriétés physiques et chimiques, la préparation, la falsification, l'action toxique et l'emploi des couleurs anciennes et nouvelles. Paris, 1855, 1 vol. gr. in-18..... 4 fr.

LEGENDRE (F. L.). — Recherches anatomo-pathologiques et cliniques sur quelques maladies de l'enfance. Paris, 1846, in-8. 6 fr.

LEHMANN. — Précis de chimie physiologique animale, traduction du professeur Brion. Paris, 1855, 1 vol. in-18, avec 26 figures. dans le texte..... 4 fr. 50

LE MAOUT (E.). — Atlas élémentaire de botanique avec le texte en regard, comprenant l'organographie, l'anatomie et l'iconographie des familles d'Europe, à l'usage des étudiants et des gens du monde. Ouvrage contenant 2,340 figures dessinées par Steinheil et Decaisne. Paris, 1840, 1 beau vol. in-4..... 15 fr.

LE MAOUT (E.). — Leçons élémentaires de botanique fondées sur l'analyse de 50 plantes vulgaires et formant un traité complet d'organographie et de physiologie végétales. Deuxième édition. Paris, 1857.

***

1 vol. grand in-8, avec l'atlas des 50 plantes vulgaires et plus de 700 fig. dessinées par J. DECAISNE. Prix, avec l'atlas colorié..... 16 fr.

Le même, avec atlas en noir..... 10 fr.

LENOIR (A.). — Atlas complémentaire de tous les traités d'accouchements, contenant 100 planches dessinées d'après nature, et lithographiées par M. E. BEAU, avec texte. Ces planches représentent le bassin et les organes génitaux de la femme adulte, le développement de l'œuf humain, les diverses présentations et positions du fœtus, les opérations obstétricales, etc. 1 beau volume grand in-8 jésus, cart.... 60 fr.

L'ouvrage sera publié en 4 fascicules.

En vente : le premier fascicule, contenant 25 planches..... 15 fr.

LEROY D'ÉTIOLLES (RAOUL). — **Des paralysies des membres inférieurs ou Paraplégies.** Recherches sur leur nature, leur forme et leur traitement. Ouvrage couronné par l'Académie impériale de médecine, concours du prix de l'Académie 1855, Ire partie et IIe partie, 1er fascicule. Paris, 1855-1857, 1 vol. in-8..... 5 fr. 75

LEROY D'ÉTIOLLES (RAOUL). — **Etudes sur la gravelle**, ses caractères physiques, ses anomalies, ses caractères chimiques, ses causes et son traitement. Paris, 1857, in-8..... 1 fr. 75

LIEBIG (J.). — Traité de chimie organique; édit. française, revue et considérablement augmentée par l'auteur, et publiée par CH. GERHARDT, professeur de chimie à la Faculté des sciences de Strasbourg. Paris, 1841-1844, 3 vol. in-8..... 25 fr.

LIEBIG J.).—La Chimie organique appliquée à la Physiologie animale et à la Pathologie ; traduction faite sur les manuscrits de l'auteur, par CH. GERHARDT, et revue par J. LIEBIG. Paris, 1842, 1 vol. in-8. 7 fr. 50

LÉVEILLÉ (J. B.). Anatomie et proportions du corps humain, à l'usage des artistes, des élèves des lycées, des cours de dessin, etc., dessinées d'après nature et lithographiées par J. B. LÉVEILLÉ. Paris, 1854.

Deux grands tableaux, format jésus, représentant les organes de la locomotion, les os et les muscles, avec une légende explicative, indiquant les conditions de l'équilibre, le nom des os, des observations pratiques sur le rôle que jouent les formes osseuses, et un résumé des proportions du corps humain ; le nom des muscles, leurs attaches, leurs usages, etc.

Prix de chaque tableau, en noir..... 3 fr.

Colorié..... 6 fr.

LEYMERIE (A.). — Cours de minéralogie (histoire naturelle), par A. Leymerie, professeur à la Faculté des sciences de Toulouse. Paris, 1857, 1 vol. in-8, publié en deux parties et accompagné de nombreuses figures..... 11 fr.

LODIEU (J. DE PLOUVAIN). — **Vaches laitières**. Étude complète des

caractères à l'aide desquels on peut reconnaître facilement une bonne laitière. Augmentée d'une étude sur l'*engraissement* et les types les plus aptes à produire de la *graisse* et du *suif*; contenant en outre des chapitres sur : 1° le système Guénon; 2° la formation d'une bonne laitière par l'alimentation et l'accouplement; 3° le lait au point de vue des différents types et dans ses rapports avec le beurre et le fromage; 4° les races. *Ouvrage couronné par la Société d'agriculture du Pas-de-Calais.* Paris, 1856, 1 vol. grand in-18, avec une vignette dessinée par mademoiselle ROSA BONHEUR..... 2 fr.

LONGET. — Traité de physiologie. Paris, 1850-1857, 2 forts volumes grand in-8 compactes, avec figures dans le texte et planches en taille-douce, noires et coloriées.

Cette édition a été épuisée avant d'être terminée. Les souscripteurs recevront prochainement le complément qui leur est dû.

LONGET. — Traité de physiologie. Deuxième édition. Paris, 1857-1858.

En vente : tome I, 3e partie : *mouvements, voix, parole et sens*; 2e partie, fascicule Ier, *digestion*, 2 fascicules grand in-8 compactes..... 8 fr.

Note. Le second fascicule de la 2e partie sera publié prochainement; le tome Ier sera complété peu après par la publication de la 1re partie, *Prolégomènes.*

Dans cette deuxième édition du *Traité de physiologie*, le tome Ier en entier ne sera en réalité qu'un second tirage de la première édition. Le tome II, au contraire, sera imprimé à nouveau et comprendra tous les changements que comportera l'état de la science La deuxième édition sera complète en 1858.

MACKENZIE (W). — Traité pratique des maladies de l'œil, traduit sur la quatrième édition et augmenté d'annotations, par MM. les docteurs WARLOMONT et TESTELIN. Paris, 1857, 2 volumes grand in-8 compactes de 1830 pages, avec 257 figures..... 30 fr.

MAGNE (J. H.). — Choix du cheval, ou Appréciation de tous les caractères à l'aide desquels on peut reconnaître l'aptitude des chevaux aux divers services. Paris, 1853, 1 volume in-18, avec 5 planches..... 1 fr. 25

MAILLARD (l'abbé). — Le Petit Entomologiste collecteur au nord de Paris, ou Description des insectes qui se trouvent dans un rayon de 120 kilomètres au nord de Paris. Première partie. COLÉOPTÈRES. Paris, 1850, 1 vol. in-18..... 80 c.

MANEC jeune. — Lettres sur l'homœopathie, ou Réfutation complète de cette méthode curative. Paris, 1855, 1 vol. in-8..... 4 fr

MARSHALL-HALL. — Aperçu du système spinal diastaltique, ou Système des actions reflexes dans ses applications à la physiologie et à la pathologie. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec figures et tableaux..... 3 fr. 50

MATTEI. — Essai sur l'accouchement physiologique et sur les moyens de le faciliter lorsqu'il ne se fait pas à l'état naturel. Paris, 1855, 1 vol. in-8..... 7 fr.

MATTEUCCI. — Leçons sur les phénomènes physiques des corps vivants. Paris, 1847, 1 vol. gr. in-18, avec 18 fig..... 3 fr. 50

MAUMENÉ (E. J.). — Indications théoriques et pratiques sur le travail des vins, et en particulier des vins mousseux. Paris, 1858, 1 vol. grand in-8, avec figures dans le texte.

MIALHE. — Chimie appliquée à la physiologie et à la thérapeutique. Paris, 1856, 1 vol. in-8..... 9 fr.

MICHAUD. — Complément de l'histoire naturelle des coquilles terrestres et fluviatiles de la France, de DRAPARNAUD. 1831, 1 vol. in-4, avec 3 planches..... 12 fr.

MOURE (A.) ET MARTIN. — Vade-mecum du médecin praticien, précis de thérapeutique spéciale, de pharmaceutique, de pharmacologie. Paris, 1845, 1 beau vol. grand in-18, compacte..... 3 fr. 50

— *Le même*, demi-reliure..... 4 fr. 50

NIEPCE DE SAINT-VICTOR. — Traité pratique de gravure héliographique sur acier et sur verre, avec un portrait de l'auteur gravé par ses procédés. Paris, 1856, petit in-4..... 5 fr.

NOIROT (L.). — Annuaire de littérature médicale étrangère pour 1857. Résumé des travaux de médecine pratique les plus remarquables publiés à l'étranger pendant l'année 1856; traduits de l'anglais, de l'allemand, du hollandais, de l'italien et de l'espagnol. 1re année. Paris, 1857, 1 vol. in-18..... 3 fr. 50

NORMANDY (A.). Tableaux d'analyse chimique, ouvrage présentant toutes les opérations de l'analyse qualitative, accompagné de nombreuses observations pratiques. Paris, 1858, 1 vol. in-4 avec figures. 25 fr.

PARCHAPPE (MAX.). — Du cœur, de sa structure et de ses mouvements, ou Traité anatomique, physiologique et pathologique des mouvements du cœur de l'homme; contenant des recherches anatomiques et physiologiques sur le cœur des animaux vertébrés. Paris, 1848, 1 vol. in-8 avec un atlas de 10 planches in-4..... 12 fr.

PARCHAPPE (MAX.). — Des principes à suivre dans la fondation et dans la construction des asiles d'aliénés. Paris, 1853, 1 vol. grand in-8, avec 20 plans des principaux asiles d'aliénés en France et à l'étranger..... 20 fr.

PARCHAPPE (MAX.). — Du siége commun de l'intelligence, de la volonté et de la sensibilité chez l'homme. 1re partie : *Preuve pathologique*. Paris, 1856, in-8..... 2 fr. 50

PAUL D'ÉGINE (Chirurgie de), texte grec, restitué et collationné sur tous les manuscrits de la Bibliothèque Impériale, accompagné de variantes de ces manuscrits et de celles des deux éditions de Venise et de Bâle, ainsi que de notes philologiques et médicales, avec traduction française en regard, précédé d'une introduction par le docteur *René Briau*. Paris, 1855, 1 vol. grand in-8..... 9 fr.

PAYER (J.). — Éléments de botanique. Paris, 1857, première partie, *Organographie*. 1 volume grand in-18 avec 600 figures intercalées dans le texte..... 5 fr.

PAYER (J.). — Botanique cryptogamique, ou Histoire des familles naturelles des plantes inférieures. Paris, 1850, 1 vol. grand in-8, avec 1,105 figures représentant les principaux caractères des genres..... 15 fr.

PAYER (J.). — Traité d'organogénie comparée de la fleur. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8, avec un atlas de 154 planches gravées en taille-douce. 2 volumes, demi-reliure maroquin, les planches montées sur onglets..... 160 fr.

PÉCLET. — Traité de la chaleur, 3 volumes grand in-8 avec 800 figures dans le texte (*sous presse*).

PELOUZE ET FRÉMY. — Abrégé de chimie. Troisième édition, conforme aux nouveaux programmes de l'enseignement scientifique des lycées. Paris, 1855, 3 vol. grand in-18, avec 174 figures intercalées dans le texte..... 5 fr.

On peut avoir séparément :

1re partie. GÉNÉRALITÉS. — CORPS SIMPLES NON MÉTALLIQUES. Classe de troisième (sciences). 1 vol. avec 96 figures..... 2 fr.

2e partie. MÉTAUX ET MÉTALLURGIE. Classe de seconde (sciences). 1 vol. avec 46 figures..... 2 fr.

3e partie. CHIMIE ORGANIQUE. Classe de rhétorique (sciences). 1 vol. avec 32 figures..... 2 fr.

PELOUZE ET FRÉMY. — Traité de chimie générale, comprenant les applications de cette science à l'analyse chimique, à l'industrie, à l'agriculture et à l'histoire naturelle. Deuxième édition. Paris, 1854-1857, 6 volumes grand in-8 compactes, avec un atlas de 53 planches gravées en taille-douce par WORMSER..... 48 fr.

PELOUZE ET FRÉMY. — Notions générales de chimie. Paris, 1853. Un beau volume imprimé avec luxe, accompagné d'un Atlas de 24 planches en couleur, cartonné..... 10 fr.

— *Le même ouvrage*, édition classique, avec 24 planches en noir. . 5 fr.

PERRIER. — De l'hygiène en Algérie, suivi d'un Mémoire sur les

pestes de l'Algérie, par Berbrugger. Paris, 1847, 2 volumes grand in-8 jésus..... 24 fr.

Cet ouvrage fait partie de l'Exploration scientifique de l'Algérie, publiée par ordre du gouvernement (section des sciences médicales).

PERSOZ. — Traité théorique et pratique de l'impression des tissus. Paris, 1846, 4 beaux vol. in 8, avec 165 figures et 429 échantillons d'étoffes, intercalés dans le texte, et accompagnés d'un atlas de 10 planches in-4 gravées en taille-douce, dont 4 sont coloriées. Ouvrage auquel la Société d'encouragement a accordé une médaille de 3,000 fr..... 70 fr.

PERSOZ (J.). — Nouveau procédé de culture de la vigne. Paris, 1849, brochure grand in-8, avec deux planches in-4 gravées en taille-douce par Wormser..... 1 fr. 50

PÉTREQUIN (J. E.). — Traité d'anatomie topographique médico-chirurgicale, considérée spécialement dans ses applications à la pathologie, à la médecine légale, à l'art obstétrical et à la chirurgie opératoire; deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8..... 9 fr.

QUATREFAGES (A. de). — Souvenirs d'un naturaliste. Paris, 1854, 2 vol. in-18..... 4 fr.

RAOUL. — Choix de plantes de la Nouvelle-Zélande, recueillies et décrites par E. Raoul, chirurgien de 1re classe de la marine impériale. Ouvrage publié sous les auspices du département de la marine et des colonies. Paris, 1846, 1 vol. grand in-4 cartonné, avec 30 planches dessinées d'après nature et gravées en taille-douce..... 8 fr.

REGNAULT. — Cours élémentaire de chimie, 5e édition. Paris, 1858, 4 vol. grand in-18, avec 2 pl. en taille-douce et 689 figures dans le texte..... 20 fr.

REGNAULT. — Premiers éléments de chimie, 3e édit. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec 142 figures dans le texte..... 5 fr.

RENDU (Victor). — Ampélographie française, comprenant la statistique, la description des meilleurs cépages, l'analyse chimique du sol et les procédés de culture et de vinification des principaux vignobles de la France. Ouvrage publié sous les auspices de M. le ministre de l'agriculture, du commerce et des travaux publics. Paris, 1857, 1 vol. de texte in-folio et un atlas de 70 planches magnifiquement coloriées... 300 fr.

L'ouvrage a été tiré à 200 exemplaires seulement. La souscription ministérielle ne laisse dans le commerce que 118 exemplaires.

— **Le même ouvrage,** 2e édition. Paris, 1857, 1 beau vol. grand in-8, avec une carte..... 9 fr.

RENOU. — Description géologique de l'Algérie, suivie d'une

notice minéralogique sur le massif d'Alger, par M. Ravergie. Paris, 1848, 1 vol. grand in-4, accompagné de 4 planches et d'une carte géologique coloriée..... 25 fr.

Ce volume fait partie de l'Exploration scientifique de l'Algérie, publiée par ordre du gouvernement (section des sciences physiques).

RÉVEIL (P. O.). — **Du lait.** Thèse de concours pour l'agrégation. Paris, 1856, grand in-8..... 3 fr.

RICORD (Philippe). — **Clinique iconographique de l'hôpital des vénériens.** Recueil d'observations suivies de considérations pratiques, sur les maladies qui ont été traitées dans cet hôpital. 1 vol. grand in-4 avec 66 planches coloriées..... 132 fr.

ROCCAS (A.). — **Des bains de mer**, de leur action physiologique et thérapeutique, de leurs applications et de leurs divers modes d'administration, avec un aperçu sur l'air et les climats marins et sur leurs effets physiologiques et thérapeutiques. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18. 3 fr. 50

RODIGAS (F.). — **Manuel de culture maraîchère.** Deuxième édition. Ouvrage couronné par le gouvernement belge. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18, avec 54 figures et un plan de jardin maraîcher..... 2 fr.

ROQUES (Joseph). — **Histoire des champignons** comestibles et vénéneux ; 2e édition, revue et considérablement augmentée. Paris, 1841, 1 vol. in-8, avec un atlas grand in-4 de 24 planches, représentant dans leurs dimensions et leurs couleurs naturelles 100 espèces ou variétés de champignons..... 16 fr.

ROUGET (Ch.). — **Développement et structure du système osseux** (Thèse de concours pour l'agrégation). Paris, 1856, in-8 avec figures..... 2 fr. 50

ROUSSEL. — **Système physique et moral de la femme**, nouvelle édition, contenant une notice biographique sur Roussel et des notes, par le docteur Cerise. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18..... 3 fr.

† **SAPPEY.** — **Traité d'anatomie descriptive.** Paris, 1850-1857, 3 tomes gr. in-18, publiés en cinq vol., avec fig. dans le texte. 27 fr.

SAUSSURE (H. de). — **Monographie des guêpes solitaires** ou de la tribu des Euméniens. Paris, 1852, 1 volume grand in-8, publié en 6 livraisons, renfermant 22 planches gravées et coloriées..... 34 fr.

SAUSSURE (H. de). — **Monographie des guêpes sociales** ou de la tribu des Vespiens, ouvrage faisant suite à la *Monographie des guêpes solitaires*, avec planches coloriées.

Prix de chaque livraison..... 6 fr.

5 livraisons sont en vente. — L'ouvrage aura 9 livraisons.

SAUSSURE (H. DE). — **Monographie des Masariens** (Troisième partie de la famille des Vespides), faisant suite à la *Monographie des guêpes sociales*. Paris, 1856, 1 vol. grand in-8 avec 16 planches gravées et coloriées..... 42 fr.

SCANZONI. — **Précis de l'art des accouchements**, traduit par le docteur P. PICARD, 1 volume grand in-18, avec figures dans le texte.

SCHREBER.—**Système de gymnastique de chambre, médicale et hygiénique**, ou Représentation et description de mouvements gymnastiques n'exigeant aucun appareil ni aide et pouvant s'exécuter en tout temps et en tout lieu, à l'usage des deux sexes et pour tous les âges, suivie d'applications à diverses affections; traduit de l'allemand par H. VAN OORDT. Paris, 1855, in-8 avec 45 fig. dans le texte..... 2 fr. 50

SCOUTETTEN (H.). — **L'Ozone**, ou Recherches chimiques, météorologiques, physiologiques et médicales sur l'oxygène électrisé. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18 avec 6 tableaux et 1 planche..... 4 fr.

SCRIVE. — **Relation médico-chirurgicale de la campagne d'Orient**, du 31 mars 1854 au 30 mars 1856. Paris, 1857, 1 vol. in-8. 7 fr. 50

SÉDILLOT. — **Traité de médecine opératoire, bandages et appareils**, 2e édition augmentée. Paris, 1855, 2 volumes grand in-18, publiés en 4 parties, avec 604 figures dans le texte..... 16 fr.

SEGOND (L. A.). — **Traité d'anatomie générale**, théorie de la structure, embrassant les substances organiques et les éléments, les tissus, les membranes et les parenchymes. Paris, 1854, in-8..... 7 fr.

SERINGE (N. C.).—**Description, culture et taille des mûriers**, leurs espèces et leurs variétés. Paris, 1855, 1 vol. grand in-8 avec figures dans le texte, accompagné d'un atlas in-4 de 27 planches..... 9 fr.

SERINGE (N. C.). — **Flore du pharmacien, du droguiste et de l'herboriste**, ou Description des plantes médicales spontanées ou cultivées en France, disposées en familles. Paris, 1852, 1 vol. grand in-18 de 800 pages, avec figures dans le texte et tableaux..... 8 fr.

SERRE (A.) (d'Uzès). — **Essai sur les phosphènes ou anneaux lumineux de la rétine**, considérés dans leurs rapports avec la physiologie et la pathologie de la vision. Paris, 1853, 1 vol. in-8, avec 34 figures dans le texte..... 7 fr. 50

SILBERT (d'Aix). — **Traité pratique de l'accouchement prématuré artificiel**, comprenant son histoire, ses indications, l'époque à laquelle on doit le pratiquer, et le meilleur moyen de le déterminer. Paris, 1855, 1 vol. in-8..... 2 fr. 75

SILBERT (d'Aix). — **De la saignée dans la grossesse**. Ouvrage

couronné par l'Académie impériale de médecine. Paris, 1857, 1 vol. in-8..... 4 fr. 50

Société de chirurgie de Paris (Mémoires de la), publiés dans le format in-4. Prix de chaque vol. avec planches..... 20 fr.

— *Franco* par la poste..... 23 fr.

Les tomes I à IV sont en vente. Le tome Ve est en cours de publication. Le volume est donné aux souscripteurs en cinq ou six fascicules qui paraissent à des intervalles indéterminés. Le prix de chaque volume est payable en retirant le premier fascicule.

Bulletin de la société. Voyez aux *Publications périodiques*, page 30.

SOUBEIRAN. — Traité de pharmacie théorique et pratique, 5e édit., entièrement refondue. Paris, 1857, 2 forts vol. in-8, avec figures dans le texte..... 17 fr.

SOUBEIRAN. — Précis élémentaire de physique, 2e édit., augmentée. Paris, 1844, 1 vol. in-8, avec 13 planches in-4..... 5 fr.

TABOURIN (F.). — Nouveau Traité de matière médicale, de thérapeutique et de pharmacie vétérinaires; suivi : 1° d'un formulaire raisonné, magistral et officinal; 2° d'une pharmacie légale, ou analyse des dispositions législatives concernant l'exercice de la pharmacie vétérinaire; 3° d'un tableau du prix approximatif des médicaments à Paris, Lyon et Toulouse. Paris, 1853, 1 vol. grand in-8 compacte, avec 82 figures..... 10 fr.

THIBIERGE (A.) ET REMILLY. — De l'amidon du marron d'Inde et des fécules amylacées d'autres substances végétales non alimentaires aux points de vue économique, chimique, agricole et technique. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-18, avec planches gravées..... 2 fr. 50

Traité de botanique comprenant : 1° l'anatomie et la physiologie végétales; 2° la classification des végétaux selon la méthode de Jussieu; 3° l'herborisation, avec l'indication des plantes médicinales les plus usuelles, de leurs différentes propriétés et de leur emploi particulier; 2e édition. Paris, 1853, 1 vol. in-18 avec 27 pl. et 3 tableaux..... 3 fr.

VELPEAU. — Traité des maladies du sein et de la glande mammaire. La deuxième édition est sous presse.

VERDO. — Précis sur les eaux minérales des Pyrénées et de toute la région qui se trouve comprise entre l'océan Atlantique et les rives de la Garonne, précédé d'un traité sur les bains en général et suivi d'un essai sur les bains de mer; seconde édition. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18 avec 1 carte..... 3 fr. 50

VIDAL (DE CASSIS). — Traité des maladies vénériennes, 2e édi-

tion, revue et augmentée ; ouvrage couronné par l'Institut de France et qui a obtenu le prix Itard de 3,700 fr. Paris, 1855, 1 vol. in-8, avec planches gravées en taille-douce et coloriées..... ..... 10 fr.

VILLE (Georges). — **Recherches expérimentales sur la végétation.** Paris, 1854, 1 vol. gr. in-4 cartonné, avec figures dans le texte et 2 planches gravées en taille-douce par Wormser..... ..... 25 fr.

VILLE (Georges). — **Recherches expérimentales sur la végétation.** Paris, 1857, 1 vol. grand in-8 avec planches photographiées. 7 fr. 50

WAGNER (H.). — **Cryptogamen-Herbarium.** Livraisons 1 à 7, petit in-folio, en étui.

Prix de chaque livraison..... 1 fr. 25

Formera environ 11 livraisons et sera terminé prochainement.

WAGNER (H.). — **Gras-Herbarium.** Livraisons 1 à 3, petit in-folio, en étui.

Prix de la livraison..... 2 fr.

WAGNER (H.). — **Phanerogamen-Herbarium.** 7 livraisons petit in-folio, en étui..... 14 fr.

WALPERS (G. G.).—**Repertorium botanices systematicæ.** Lipsiæ, 1842-1848, 6 volumes in-8..... 140 fr.

WALPERS (G. G.). — **Annales botanices systematicæ.** Lipsiæ, 1848-1853, in-8. Tomes I à III..... 90 fr.

— 1857, tome IV, fascicules I à III. Prix de chaque..... 5 fr.

WEBB (P. B.). — **Otia hispanica,** seu Delectus plantarum rariorum aut nondum rite notarum per Hispanias sponte nascentium. Paris, 1853, 1 vol. petit in-folio, avec 45 planches gravées en taille-douce..... 30 fr.

WEBB (Phil. Barker). — **Fragmenta florulæ æthiopico-ægyptiacæ ex plantis præcipue ab Ant. Figari** Museo Florentino missis. Grand in-8. Paris, 1854..... 2 fr.

WECKHERLIN (A. de).—**Zootechnie générale.** Reproduction, amélioration, élevage des animaux domestiques ; traduits de l'allemand, par M. Verheyen. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18..... 2 fr.

ZIMMERMANN.— **La Solitude.** Traduction nouvelle par **X. Marmier.** Paris, 1855, 1 vol. grand in-18..... 3 fr.

† PUBLICATIONS PÉRIODIQUES.

Annales de chimie, par MM. Guyton de Morveau, Lavoisier, Monge, Berthollet, Fourcroy, etc. Paris, 1789 à 1815 inclusivement, 96 volumes

in-8, figures, et 3 vol. de tables..... 500 fr.

Annales de chimie. Table générale raisonnée des matières contenues dans les 96 vol. Paris, 3 vol. in-8, pris séparément..... 24 fr.

Les collections complètes de cette première série sont excessivement rares.

Annales de chimie et de physique, IIe série; par MM. GAY-LUSSAC et ARAGO. Paris, 1816 à 1840, 25 années, formant avec les tables 78 vol. in-8, accompagnés d'un grand nombre de planches gravées..... 350 fr.

— Table générale raisonnée des matières comprises dans les tomes I à LXXV (1816 à 1840). 3 vol. in-8 pris séparément..... 20 fr.

Quelques-unes des années de 1816 à 1840 sont vendues séparément, de..... 20 à 30 fr.

Annales de chimie et de physique, IIIe série, commencée en 1841, rédigée par MM. CHEVREUL, DUMAS, PELOUZE, BOUSSINGAULT, REGNAULT et DE SÉNARMONT, avec une revue des travaux de chimie et de physique publiés à l'étranger par MM. WURTZ et VERDET.

Il paraît chaque année 12 cahiers qui forment 3 volumes et sont accompagnés de planches en taille-douce et de figures intercalées dans le texte. L'année 1858 correspond aux tomes LII à LIV de la 3e série.

PRIX de l'année. { Pour Paris..... 30 fr.
Pour les départements (*par la poste*)..... 34 fr.

— Table générale raisonnée des matières contenues dans les tomes I à XXX de la IIIe série. Paris, 1851, 1 vol. in-8..... 5 fr.

La collection complète, 1789 à 1857 et tables; 226 vol. in-8.... 1,365 fr.

Annales des sciences naturelles. Ire série, 1824 à 1833 inclusivement, publiées par MM. AUDOUIN, AD. BRONGNIART et DUMAS. 30 vol. in-8, 600 planches environ..... 240 fr.

— Table générale des matières des 30 vol. qui composent cette série. Paris, 1841, 1 vol. in-8..... 8 fr.

Annales des sciences naturelles, comprenant la zoologie, la botanique, l'anatomie et la physiologie comparées des deux règnes et l'histoire des corps organisés fossiles.

IIe série (1834 à 1843), rédigée, pour la zoologie, par MM. AUDOUIN et MILNE-EDWARDS; pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART, GUILLEMIN et DECAISNE.

IIIe série (1844 à 1853), rédigée, pour la zoologie, par M. MILNE-EDWARDS; et pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART et DECAISNE.

La IIe et la IIIe série forment deux parties avec une pagination distincte, et comprennent chacune, avec les tables générales des matières et celles des auteurs, 40 volumes, format

in-8 sur raisin, accompagnés d'environ 700 planches gravées en taille-douce et souvent coloriées.

Prix des 40 volumes composant chaque série, cartonnés..... 380 fr.
Chaque année séparément, 4 volumes cartonnés..... 38 fr.

On peut avoir séparément, pour chaque série:

LA ZOOLOGIE, 20 vol. avec la table. 250 fr. | LA BOTANIQUE, 20 vol. avec la table.. 250 fr.
Chaque année à part....., 25 fr. | Chaque année à part..... 25 fr.

Annales des sciences naturelles, IVe série, commençant le 1er janvier 1854, comprenant la zoologie, la botanique, l'anatomie et la physiologie comparées des deux règnes et l'histoire des corps organisés fossiles, rédigées, pour la zoologie, par M. MILNE-EDWARDS; pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART et DECAISNE.

Cette IVe série est publiée dans les mêmes conditions que la troisième.

Les deux parties ont une pagination distincte, et forment, chaque année, deux volumes de botanique et deux volumes de zoologie; elles sont accompagnées chacune de 35 planches gravées avec soin, et coloriées toutes les fois que le sujet l'exige.

		Pour Paris,	les départements.
PRIX :	Pour les deux parties réunies.....	38 fr.	40 fr.
	Pour une partie séparément.....	25	27

La collection complète, 1824 à 1856 inclusivement, 123 volumes y compris les tables..... 1,122 fr.

Annales d'oculistique fondées par le docteur CUNIER, continuées par les docteurs FALLOT, ROSCH, HAIRION, VAN ROOSBROECK et WARLOMONT.

Ces *Annales*, publiées à Bruxelles, paraissent par livraisons mensuelles formant dans l'année 2 vol. in-8 d'environ 300 pages.

L'abonnement part du 1er janvier. — Prix pour la France..... 16 fr.

Annales médico-psychologiques, journal de l'Anatomie, de la Physiologie et de la Pathologie du système nerveux, destiné particulièrement à recueillir tous les documents relatifs à la science des rapports du physique et du moral, à l'aliénation mentale, et à la médecine légale des aliénés; publiées par MM. les docteurs BAILLARGER, médecin des aliénés à l'hospice de la Salpêtrière, CERISE et LONGET.

Ire série, de 1843 à 1848, 12 volumes in-8, avec planches..... 90 fr.

Chaque année prise séparément..... 20 fr.

Annales médico-psychologique, IIe série, 1849 à 1854, par BAILLARGER, BRIÈRE DE BOISMONT et CERISE. 6 vol. in-8..... 72 fr.

IIIe série, commençant en 1855, journal destiné à recueillir tous les do-

cuments relatifs à l'aliénation mentale, aux névroses, et à la médecine légale des aliénés, par MM. BAILLARGER, MOREAU (de Tours) et CERISE.

Cette série paraît par cahiers trimestriels qui forment, à la fin de l'année, un volume in-8 de 700 pages.

Des planches sont ajoutées lorsqu'elles sont nécessaires.

PRIX de l'année : { Pour Paris..... 12 fr. / Pour les départements (*par la poste*)..... 14 fr.

La collection complète, 1843 à 1857 inclusivement, 20 vol. in-8. 198 fr.

Bulletin mensuel de la Société impériale zoologique d'Acclimatation, fondée le 10 février 1854.

Il paraît chaque année 12 cahiers formant un volume grand in-8 de 700 pages.

Le tome IV correspond à l'année 1858. Le bulletin est envoyé sans rétribution à tous les membres de la Société à partir du commencement de l'année où ils sont reçus.

Prix de l'abonnement pour les personnes qui ne font pas partie de la Société :

Paris..... ..... 12 fr. | Départements..... 14 fr.

Bulletin de la Société anatomique de Paris. — Anatomie normale. — Anatomie pathologique. — Clinique. 31e année, 2e série commençant en 1856.

Ces bulletins sont publiés par cahiers bimensuels et forment chaque année un volume in-8 d'environ 500 pages.

Prix de l'abonnement annuel : { Paris.. ..... 7 fr. / Départements..... 8 fr.

Bulletin de la Société de chirurgie de Paris.

Il est publié chaque année (de juillet à juin) 1 vol in-8 qui paraît en plusieurs fascicules. Le tome VII correspond de juillet 1856 à juin 1857.

Tome Ier, correspondant aux années 1848-1850..... ..... 8 fr.
Chacun des volumes suivants..... 7 fr.

Gazette hebdomadaire de médecine et de chirurgie, bulletin de l'enseignement médical, publié sous les auspices du ministère de l'instruction publique, organe de la Société médicale allemande, de la Société de médecine du département de la Seine et de la Société anatomique. Rédacteur en chef : le docteur A. DECHAMBRE.

La GAZETTE HEBDOMADAIRE, publiée dans le format in-4, paraît, depuis le 7 octobre 1853, le vendredi de chaque semaine. Elle contient régulièrement, par numéro, 32 colonnes, et de plus, elle donne au moins 160 colonnes de

supplément réparties entre ses cinquante-deux numéros. Au bout de l'année, elle forme un beau tome, de plus de 950 pages, enrichi de nombreuses figures et d'une dimension commode pour les bibliothèques.

L'année 1858 correspond au tome V.

Prix de l'abonnement : Paris et départements,

Un an, 24 francs. — Six mois, 13 francs. — Trois mois, 7 francs.

Journal de pharmacie et de chimie, par MM. BOULLAY, BUSSY, SOUBEIRAN, HENRY, F. BOUDET, CAP, BOUTRON-CHARLARD, FRÉMY, GUIBOURT, GOBLEY, BUIGNET, BARRESWIL et LÉON SOUBEIRAN ; contenant une Revue médicale, par M BERNARD, de l'Institut, le Bulletin des travaux de la Société de pharmacie de Paris et de la Société d'émulation, et une Revue des travaux chimiques publiés à l'étranger par M. J. NICKLÈS, IIIe série, ayant été commencée en janvier 1842.

Le Journal de Pharmacie et de Chimie paraît tous les mois par cahiers de 5 feuilles. Il forme chaque année deux volumes in-8 ; des planches sont jointes au texte toutes les fois qu'elles sont nécessaires.

Prix de l'abonnement pour Paris et les départements ..... 15 fr.

Collections du Bulletin et du Journal de Pharmacie.

La Ire série se compose de 6 volumes publiés sous le titre de *Bulletin de Pharmacie*, de 1809 à 1814. Prix de ces volumes..... 50 fr.

La IIe série, de 1815 à 1841, comprend, sous le nom de *Journal de Pharmacie et des Sciences accessoires*, 27 vol. et 2 tables. Prix..... 200 fr.

Nota. On ne vend séparément aucun des volumes composant la Ire et la IIe série.

La collection complète, 1809 à 1857 inclusivement, 65 volumes, y compris les tables..... 490 fr.

ACADÉMIE ROYALE DE MÉDECINE DE BELGIQUE (Publications de l').

Mémoires de l'Académie royale de médecine de Belgique. Tomes I à IV, grand in-4, avec planches. Chaque volume..... 10 fr.

Mémoires des concours et des savants étrangers. Tomes I, II et III, grand in-4. Chaque volume..... 10 fr.

Bulletin de l'Académie royale de médecine de Belgique. I à XV. Chaque volume..... 10 fr.

L'abonnement à l'année courante..... 10 fr.

L'INGÉNIEUR ; Revue scientifique et critique des travaux publics. M. V. AVRIL, directeur. Nouvelle série.

La nouvelle série de l'*Ingénieur* paraît le premier de chaque mois, à partir de janvier 1857, par cahiers comprenant la valeur de six planches gravées grand in-4° et de deux à trois feuilles de texte même format. Les

douze cahiers forment chaque année un volume de texte et un atlas représentant environ soixante-douze planches in-4°. L'abonnement part du 1er janvier et n'est reçu que pour l'année entière.

Paris..... ..... 16 fr. | Départements..... 18 fr.

VENTE DES COLLECTIONS.

L'année 1852, 1 vol. grand in-8 avec 10 pl., 2e édition..... 10 fr.

De l'année 1853, il ne reste que les cahiers de juin à décembre, format in-8..... 5 fr.

De l'année 1854, restent quelques exemplaires de mai à décembre, 1 vol. in-4 avec 11 planches in-folio..... 10 fr.

L'année 1855, 1 vol grand in-4 avec la valeur de 48 planches du même format, et figures dans le texte..... 15 fr.

L'année 1856, 1 vol. grand in-4 avec la valeur de 62 planches..... 15 fr.

L'année 1857, 1 vol. grand in-4 avec la valeur de 80 planches..... 16 fr.

PRIX DE L'ABONNEMENT AUX JOURNAUX

Publiés par la librairie VICTOR MASSON.

NOMS DES PAYS.	Annales des Sciences Naturelles.	Annales de Chimie et de Physique.	Gazette Hebdomadaire.	Journal de Pharmacie.	L'Ingénieur.	Annales Médico-Psychologiques et Société d'Acclimatation
Paris	38	30	24	15	16	12
France et Algérie	40	34	24	15	18	14
Angleterre et Malte	44	35	27	17	20	15
Autriche	45	35	23	18	20	15
Bavière, jusqu'à la front.	42	34	24	15	18	14
Belgique	45	36	27	17	20	15
Bolivie, Californie, Chili, Pérou	56	40	36	21	24	17
Colonies, Etats-Unis du Nord, Australie, Brésil, Canada, Chine, Cuba, Mexique (Voie d'Angleterre)	47	37	29	18	20	16
Duchés de Modène, Parme.	42	35	25	16	20	15
Espagne	50	42	28	20	24	17
Etats Romains	53	38	31	20	24	16
Grèce	51	41	27	20	20	16
Pays-Bas	44	35	27	17	20	15
Portugal	44	35	25	16	20	15
Prusse, Pologne, Russie, Saxe, Suède	45	35	28	18	20	15
Sardaigne	44	37	26	16	20	15
Sicile	48	36	30	18	20	15
Suisse	45	36	25	16	20	15
Toscane	47	36	29	18	20	15
Turquie, Syrie, Égypte	44	36	27	17	20	16

— Corbeil, typographe de Crete. —

L'INGÉNIEUR

REVUE SCIENTIFIQUE ET CRITIQUE

DES TRAVAUX PUBLICS ET DE L'INDUSTRIE

M. V. AVRIL, directeur.

NOUVELLE SÉRIE PUBLIÉE PAR LES LIBRAIRES :

VICTOR MASSON, LANGLOIS ET LECLERCQ.

Depuis 1852, époque de sa fondation, l'INGÉNIEUR était consacré spécialement à la construction; nous avons pensé qu'il convenait d'élargir ce cadre. *L'Ingénieur* s'occupe à la fois des travaux publics et des applications industrielles. Les matières du journal sont ainsi classées :

Constructions. — Sous ce titre nous comprenons tout ce qui intéresse l'habitation urbaine et rurale, soit au point de vue de l'architecture, soit au point de vue des procédés nouveaux et économiques.

Chemins de fer. — Ce chapitre se subdivise en trois sections : La construction et le matériel fixe; — Le matériel roulant; — Les statistiques et les questions d'exploitation; — La science télégraphique.

Navigation et travaux hydrauliques. — La navigation s'efforce de reconquérir par le touage et les propulseurs le rôle que les chemins de fer lui ont fait perdre. Nous tiendrons les abonnés au courant des progrès de cette lutte si intéressante.

L'outillage maritime, les constructions navales n'ont en France aucun organe spécial; cette lacune sera comblée par l'importance que nous donnons à ces travaux.

Mines et métallurgie. — Sous ce titre viennent se classer les travaux géologiques, l'outillage des mines et les constructions métallurgiques, qui ne sont en France l'objet d'aucune publication.

Contentieux. — Les travaux publics, la construction et l'exploitation des chemins de fer, les questions d'existence de privilége en matière de brevet d'invention, toutes ces matières seront traitées, avec le soin qu'elles réclament, par un comité d'ingénieurs et d'hommes spéciaux.

Revue de la presse technique. — Chaque numéro contient une analyse des principaux recueils périodiques et des ouvrages spéciaux qui sont publiés en France, en Belgique, en Angleterre, en Allemagne, etc.

Feuilleton. — Cette partie du journal sera une *Chronique des ateliers*, plus spécialement consacrée aux inventions et aux procédés caractéristiques du moment.

Exposer avec simplicité, rechercher les procédés pratiques et économiques, préférer l'expérience à la théorie, telle est la méthode que l'*Ingénieur* suivra avec confiance.

Les Éditeurs,

VICTOR MASSON, LANGLOIS ET LECLERCQ.

CONDITIONS DE PUBLICATION :

La nouvelle série de l'*Ingénieur* paraît le premier de chaque mois, à partir de janvier 1857, par cahiers comprenant la valeur de six planches gravées grand in-4 et de deux à trois feuilles de texte même format avec figures intercalées. Les douze cahiers forment, chaque année, un volume de texte et un atlas représentant environ soixante-douze planches in-4. L'abonnement part du 1er janvier et n'est reçu que pour l'année entière.

On s'abonne à Paris, à la Librairie VICTOR MASSON,

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, 17.

PRIX : POUR PARIS... 16 fr. | POUR LES DÉPART.... 18 fr.

ÉTRANGER :

Bade, Bavière, Portugal (jusqu'à la frontière française seulement).....	18 fr.
Bolivie, Californie, Chili, Espagne, Etats romains, Sardaigne.....	24 fr.
Tous les autres Etats de l'Europe et des deux Amériques.....	20 fr.

NOTA. — *MM. les Souscripteurs de l'étranger devront recourir à un Libraire de leur ville ou envoyer un mandat sur Paris.*

VENTE DES COLLECTIONS.

L'année 1852, 1 vol. grand in-8 avec 10 planches. Deuxième édition. 10 fr.
De l'année 1853, il ne reste que les cahiers de juin à décembre, format in-8..... 5 fr.
De l'année 1854, restent quelques exemplaires de mai à décembre, 1 vol. in-4 avec 11 planches, in-folio..... 10 fr.
L'année 1855. 1 vol. grand in-4 avec la valeur de 48 planches du même format, et figures dans le texte..... 15 fr.
L'année 1856. 1 vol. grand in-4 avec la valeur de 62 planches..... 15 fr.

Les principales planches publiées en 1857 sont : Achèvement du Louvre. Combles en fer du pavillon Denon. — Chauffage à circulation d'eau du couvent de Magdebourg. — Carrosserie du chemin de fer de l'Est. — Disques à sonneries électriques du chemin de fer de Lyon. — Machine à vapeur pour gravir les rampes au moyen d'une chaîne fixe. — Pont métallique sur le Guadalquivir. — Réservoir métallique d'Ygos. — Tunnel sous-marin entre la France et l'Angleterre. — Cheminée chaudière de Masmyth — Foyer fumivore économique. — Machine à fondre les caractères d'imprimerie. — Bateau toueur Arnoux. — Carte des courants du Gulf Stream. — Égouts de Paris. Travaux du pont de Saint-Nazaire, etc., etc.

CORBEIL, typ. et stér. de CRÉTÉ.

Détacher ce bulletin, remplir les blancs, indiquer bien lisiblement le nom et l'adresse, plier et jeter à la poste.

Je déclare m'abonner à L'INGÉNIEUR, *pour l'année* 1858. *et j'autorise à faire sur moi, pour prix de cet abonnement, un mandat de* DIX-HUIT FRANCS, *payable à un mois de ce jour.*

A *le* 18

SIGNATURE ET ADRESSE.

L'INGÉNIEUR.

A la librairie Victor Masson,

place de l'École-de-Médecine, 17.

A PARIS.